

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FRANCO VIEIRA DE SOUZA

DESVIO DE OBSTÁCULOS MÓVEIS EM ANDADOR INTELIGENTE
POR MEIO DAS TÉCNICAS DE DESVIO DE PONTO CRÍTICO E
CAMPOS POTENCIAIS

VITÓRIA, BRASIL
AGOSTO 2018

FRANCO VIEIRA DE SOUZA

DESVIO DE OBSTÁCULOS MÓVEIS EM ANDADOR INTELIGENTE
POR MEIO DAS TÉCNICAS DE DESVIO DE PONTO CRÍTICO E CAM-
POS POTENCIAIS

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenha-
ria Elétrica do Centro Tecnológico da Uni-
versidade Federal do Espírito Santo, como
requisito parcial para a obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Anselmo Frizera Neto

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Andrés Cifuentes García

Vitória, Brasil

Agosto 2018

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas
- SIBI/UFES e elaborada pelo autor

S719d Souza, Franco Vieira de, 1990-
Desvio de obstáculos móveis em andador inteligente por meio
das técnicas de desvio de ponto crítico e campos potenciais
/ Franco Vieira Souza. - 2018.
76 f. : il.

Orientador: Anselmo Frizera Neto.
Coorientador: Carlos A. Cifuentes.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. andador inteligente. 2. robótica móvel. 3. desvio de obstáculos. 4. campos potenciais. I. Frizera Neto, Anselmo. II. Cifuentes, Carlos A.. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

Franco Vieira de Souza


Desvio de obstáculos móveis em andador inteligente por meio das técnicas de desvio de ponto crítico e campos potenciais

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.


Trabalho aprovado. Vitória, Brasil, 26 de setembro de 2018:



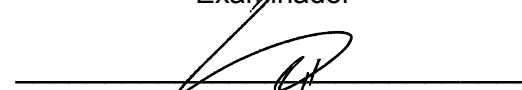
Prof. Dr. Anselmo Frizera Neto
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Prof. Dr. Carlos Andrés Cifuentes García
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Coorientador



Prof. Dr. Teodiano Freire Bastos Filho
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador



Dr. Joaquín Ballesteros
Mälardalen University
Examinador

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Anselmo Frizera Neto, pela orientação ao longo de todo o Mestrado. O presente trabalho só foi possível graças à sua impressionante diligência como orientador, estando sempre disposto a dividir seu conhecimento e experiência, e a realizar críticas sem nunca agir de forma desencorajadora. Sou particularmente grato pelo misto de apoio e cobrança que recebi durante os percalços encontrados, me levando sempre a tentar dar o meu melhor.

Ao Prof. Dr. Carlos Andrés Cifuentes García, coorientador desta Dissertação, e aos colegas de laboratório Mario Jimenez e Ricardo Mello, que contribuíram diretamente na realização desse trabalho. Trabalhar com vocês foi um prazer e uma honra.

Aos demais colegas de laboratório do NTA, professores do PPGEE, e ex-colegas do CISNE, pela companhia e disposição em ouvir e em me passar seus conhecimentos e suas experiências.

Aos órgãos e programas que forneceram apoio financeiro e tornaram possível este trabalho: CNPq, que me concedeu minha bolsa de estudos, ao projeto *Colciencias Desarrollo de una plataforma robótica adaptable para rehabilitación y asistencia de la marcha* (Contrato 801-2017), e ao projeto FAPES Cloud Walker: Estratégias de Interação Humano-Ambiente e Computação em Nuvem para Marcha Assistida por Andador Robótico (80709036).

Por fim, à minha família, pelo amor e apoio que nunca me faltaram.

Resumo

Andadores inteligentes são dispositivos assistivos que utilizam tecnologias robóticas e eletrônicas para expandir e aprimorar as funcionalidades dos andadores ortopédicos tradicionais. Uma das funções mais relevantes que andadores inteligentes podem executar é o auxílio à navegação, que inclui tarefas como planejamento de caminho e desvio de obstáculos. Tais funções podem ser úteis a usuários que apresentem deficiências de visão ou cognitivas juntamente com deficiências de locomoção. A presente Dissertação de Mestrado propõe e valida uma técnica de desvio de obstáculos móveis em um andador inteligente, tendo como objetivo melhorar a forma como andadores inteligentes auxiliam a navegação de seu usuário quando o ambiente é compartilhado com outras pessoas, que constituem obstáculos móveis. A técnica proposta, denominada desvio de ponto crítico, é inspirada na forma como pedestres negociam o espaço em um corredor, e tenta fazer com que o andador desvie com antecedência de obstáculos móveis em rota de colisão, ignorando os que não colidirão. A técnica de desvio de ponto crítico pode ser combinada com a técnica de campos potenciais, que também é utilizada para o desvio de obstáculos em andadores inteligentes e que apresenta bons resultados ao lidar com obstáculos fixos. Ao combinar essas duas técnicas, tem-se por objetivo produzir uma estratégia que lida bem tanto com obstáculos fixos quanto móveis. A validação da estratégia proposta foi feita comparando, em simulação, a estratégia clássica de desvio por campos potenciais com uma implementação da combinação dos campos potenciais e da técnica de desvio de ponto crítico. Verificou-se que, com a estratégia proposta, a ação de desvio ocorreu com antecedência, e assim foi possível evitar um obstáculo móvel em corredor utilizando forças menores e mantendo uma maior distância.

Palavras-chave: andador inteligente, robótica móvel, desvio de obstáculos, campos potenciais.

Abstract

Smart walkers are assistive devices that employ robotics and electronics in order to expand and enhance the functions that can be performed by traditional orthopedic walkers. One of the most relevant functions of smart walkers is navigations assistance, which includes tasks as path planning and obstacle avoidance. These functions can be useful to people that suffer from vision or cognitive disabilities along with mobility disabilities. This master's thesis proposes and validates a moving obstacle avoidance technique for smart walkers that intends to improve the way these walkers assist the user's navigation in environments that are simultaneously being used by other people. The proposed technique – critical point avoidance – attempts to mimic the way pedestrians negotiate space in a corridor by trying to avoid moving obstacles that are in a collision course with the walker in advance, while ignoring obstacles that should not result in a collision. The critical point avoidance technique can be combined with the potential fields technique, which has been shown to perform well when dealing with static obstacles and is also used for obstacle avoidance in smart walkers. The combination of both techniques is an attempt at producing a strategy that is able to better cope with moving and static obstacles. The proposed strategy was validated by comparing, in a simulated smart walker, the classic potential fields strategy to a combination of the critical point avoidance and potential fields techniques. As expected, when simulating a moving object in a corridor, the proposed strategy produced an avoidance action that happens in advance, resulting in weaker avoidance forces and a greater minimum distance to the obstacle.

Keywords: smart walkers, moving robots, obstacle avoidance, potential fields.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	4
1.3	Justificativa	4
1.4	Organização do texto	5
2	Embasamento teórico	6
2.1	Dispositivos assistivos para locomoção	6
2.2	Andadores tradicionais	8
2.3	Andadores inteligentes	11
2.3.1	Atuadores	13
2.3.2	Sensores	14
2.3.3	Computador embarcado	15
2.4	Navegação de robôs móveis	15
2.4.1	Visão geral	15
2.4.2	Arquiteturas de controle de navegação	18
2.4.3	Desvio de obstáculos em robôs móveis	19
2.5	Desvio de obstáculos em andadores inteligentes	24
2.5.1	Visão geral	24
2.5.2	Revisão da literatura	25
3	Algoritmo proposto	29
3.1	Visão geral	29
3.2	Motivação do algoritmo	29
3.3	Situações problemáticas	31
3.4	Tentativas preliminares	33
3.4.1	Desvio do ponto de colisão	33
3.4.2	Desvio do ponto próximo	37
3.5	Desvio de ponto crítico	42
4	Materiais e Métodos	45
4.1	Implementação prática	45
4.1.1	Controle de admitância em robô unicycle	45
4.1.2	Campos potenciais a partir de LIDAR	47
4.1.3	Classificação e <i>tracking</i> de obstáculos	48

4.2	UFES Smart Walker	49
4.2.1	Descrição	49
4.2.2	Implementação da estratégia	50
4.3	Simulação em ambiente virtual	52
4.3.1	ROS – Robot Operating System	52
4.3.2	GAZEBO	53
4.3.3	Protocolo experimental das simulações	57
5	Validação experimental, resultados e discussão	59
5.1	Testes em simulação	59
5.1.1	Testes com campos potenciais	59
5.1.2	Teste com desvio de ponto crítico	62
5.1.3	Discussão	64
5.2	Testes qualitativos no UFES Smart Walker	64
5.2.1	Testes com campos potenciais	65
5.2.2	Testes com o desvio de ponto de colisão	67
5.2.3	Cruzamento de corredor com desvio de ponto próximo x campos potenciais	67
6	Conclusão e trabalhos futuros	69
6.1	Conclusão e discussão	69
6.2	Contribuições	70
6.2.1	Publicações	70
6.2.2	Contribuições adicionais	70
6.2.3	Trabalhos futuros	70

Lista de Figuras

Figura 1 - Tabela com a prevalência de tipos de deficiência em adultos, separados por idade.	1
Figura 2 – Número de resultados envolvendo o termo “ <i>smart walker</i> ” ao longo do tempo	3
Figura 3 - Diversos tipos de dispositivos de assistência à locomoção: bengalas, muletas, andadores e cadeiras de rodas.	6
Figura 4 - Cadeira de rodas "stand up".	8
Figura 5 – Alguns tipos de andadores tradicionais: convencional sem rodas, com rodas e pés, e com rodas	8
Figura 6 - Ciclo de marcha em um andador tradicional sem rodas	9
Figura 7 - Andador modificado com bolas de tênis.	10
Figura 8 - Queda para frente em andador com rodas.	11
Figura 9 - Bengala e andador inteligente PAMM.....	12
Figura 10 - Protótipos de andadores na literatura: MARC Walker (a), RT Walker (b), GUIDO (c), SIMBIOSIS (d), ASBGo (e), e UFES Smart Walker (f).	13
Figura 11 - Ilustração de técnica de detecção e tracking de obstáculos móveis. Os pontos obtidos pelo LIDAR são agrupados em paredes (linhas pretas), obstáculos fixos (círculo preto) e obstáculos móveis (círculos verdes).	16
Figura 12 - Localização a partir de filtro de partículas. Conforme o robô recebe leituras do ambiente, sua estimativa de posição no mapa melhora.	17
Figura 13 - Arquitetura NASREM.	18
Figura 14 - Arquitetura de controle de carro autônomo.	19
Figura 15 - Campos potenciais.....	21
Figura 16 - Campos de força virtuais (VFF).	22
Figura 17 - Oscilação provocada por campos potenciais.	23
Figura 18 - Histograma de campo vetorial (VFH).	23
Figura 19 - Janela dinâmica.	24
Figura 20 - Deformação de caminho	24
Figura 21 - LIDAR inclinado do RT Walker.....	28
Figura 22 - Colisão devido ao movimento do obstáculo.....	31
Figura 23 - Situações problemáticas causadas por obstáculos móveis.	32
Figura 24 - Comportamento desejado para desvio obstáculos móveis desejado.....	33
Figura 25 - Desvio do ponto de colisão.	34
Figura 26 - Diagrama de fluxo do desvio de ponto próximo	36
Figura 27 - Comparação de forças produzidas por campos potenciais (a) e desvio de ponto de colisão (b) em pontos próximos ao andador. Considerou-se que o vetor da velocidade relativa entre o obstáculo e o andador aponta para baixo.....	37
Figura 28 - Descontinuidade no desvio de ponto de colisão.	37
Figura 29 - Desvio de ponto próximo.	38
Figura 30 – Problemas no desvio de ponto próximo. Os obstáculos à esquerda e à direita se encontram à mesma distância do andador e a velocidades (vetores verdes) com mesmo módulo. No entanto, somente o obstáculo da esquerda, que aproxima menos do andador, produz uma força de desvio (em vermelho).	40

Figura 31 - Diagrama de fluxo da técnica de desvio de ponto próximo.....	41
Figura 32 - Desvio de ponto próximo (a) e crítico (b).	43
Figura 33 - Distinção entre o ponto próximo e o ponto crítico. A curva vermelha representa a intensidade da força de repulsão, que a técnica de ponto crítico tenta maximizar.	44
Figura 34 - Diagrama de fluxo do desvio de ponto crítico.	44
Figura 35 – Andador com rodas com cinemática de robô uniclo.	46
Figura 36 - Conjunto de pontos resultante de uma leitura de um LIDAR.	48
Figura 37 - UFES Smart Walker.....	49
Figura 38 - Blocos no Simulink.....	51
Figura 39 - Nós e tópicos no ROS para a implementação da estratégia de desvio.	54
Figura 40 - Simulação de robô humanóide no GAZEBO.....	55
Figura 41 - Modelo do UFES Smart Walker no GAZEBO.	56
Figura 42 - Condições iniciais para o experimento com cruzamento em corredor.	58
Figura 43 - Colisão causada por força de desvio muito reduzida ($F_{MAX} = 30N$ e $d_{MAX} = 1,5m$).	60
Figura 44 - Trajetórias para $d_{MAX} = 1,3m$	60
Figura 45 - Trajetórias para $d_{MAX} = 1,5m$	61
Figura 46 - Trajetórias para $d_{MAX} = 2,0m$	62
Figura 47 - Trajetória para o desvio de ponto crítico.	63
Figura 48 – Gráficos de módulo e ângulo de força de desvio (vermelho e verde) e de distância até o obstáculo com o desvio de ponto crítico (azul).....	63
Figura 49 - Testes sendo realizados no UFES Smart Walker	64
Figura 50 - As forças de desvio em (b) e (c) são indesejadas pois o andador não se encontra mais em rota de colisão com a parede.....	66
Figura 51 - Trajetórias dos andadores com campos potenciais (a) e desvio de ponto próximo (b).	68
Figura 52 – Forças de desvio em x (vermelho) e y (azul) produzidas por campos potenciais e desvio de ponto próximo.	68

Lista de Termos

SLAM: *Simultaneous Localization and Mapping*. Localização e mapeamento simultâneos.

SLAMMOT: SLAM + *Moving Object Tracking* – *tracking* de objetos móveis.

LIDAR: *Light Detection And Ranging*.

Câmera RGBD: câmeras com leituras de cor (RGB) e profundidade (*Depth*). Um exemplo é o Microsoft Kinect™.

OCR: *Optical Character Recognition*.

NASREM: NASA/NBS *Standard Reference Model Architecture*.

1 Introdução

1.1 Motivação

Com a diminuição da taxa de natalidade e o aumento na expectativa de vida, a população mundial vem envelhecendo. Estima-se que o número de pessoas com mais de 60 anos de idade irá de 600 milhões para 2 bilhões entre os anos 2000 e 2050¹. No Brasil, estima-se que a fração da população com mais de 60 anos passará de 10% a 20% entre 2010 e 2030. Ou seja, o país terá apenas 20 anos para se adaptar a essa nova realidade – muito pouco tempo quando se considera que países como a França e a Suécia observaram um aumento similar ao longo de 150 e 100 anos, respectivamente¹.

O envelhecimento populacional implica diversas consequências preocupantes, como o aumento nos custos dos sistemas de saúde e previdência. Um índice bastante usado para mensurar tais efeitos é o PSR – *potential support ratio* – que mede a razão entre pessoas em idade economicamente ativa e inativa. No Brasil, esse índice encontrava-se em 7.7 em 2015, e projeta-se uma queda para 2.5 em 2050². Para enfrentar essa realidade, é crucial implantar medidas eficientes para aumentar a saúde e a independência dos idosos.

O processo de envelhecimento também traz consigo uma tendência de declínio na capacidade funcional dos diversos órgãos e sistemas do corpo³. Uma das consequências disso é o aumento, com a idade, na prevalência de deficiências de visão e mobilidade. Entre essas duas, as deficiências de mobilidade são as mais comuns, afetando cerca de 27% da população com mais de 65 anos⁴. A Figura 1 mostra a prevalência de vários tipos de deficiência na população, realizando uma separação por sexo e idade.

Figura 1 - Tabela com a prevalência de tipos de deficiência em adultos, separados por idade.

TABLE 2. Prevalence* of any disability and disability type† by select sociodemographic characteristics among adults aged ≥18 years — Behavioral Risk Factor Surveillance System, United States, 2013

Characteristic	Respondents [§] (No.)	Type of disability [¶]											
		Vision		Cognition		Mobility		Self-care		Independent living		Any	
		(%)	(95% CI)	(%)	(95% CI)	(%)	(95% CI)	(%)	(95% CI)	(%)	(95% CI)	(%)	(95% CI)
Sex													
Male	190,711	(4.2)	(4.0–4.4)	(9.3)	(9.1–9.6)	(11.3)	(11.0–11.5)	(3.5)	(3.3–3.7)**	(5.0)	(4.8–5.2)	(19.8)	(19.4–20.1)
Female	274,342	(5.0)	(4.9–5.2)	(11.9)	(11.6–12.2)	(14.6)	(14.3–14.9)	(3.7)	(3.5–3.8)	(7.9)	(7.7–8.1)	(24.4)	(24.1–24.8)
Age group (yrs) ^{††}													
18–44	129,528	(2.9)	(2.7–3.1)	(10.1)	(9.8–10.4)	(5.5)	(5.2–5.7)	(1.9)	(1.8–2.0)	(4.4)	(4.2–4.6)	(15.7)	(15.3–16.0)
45–64	181,941	(6.5)	(6.2–6.7)	(12.0)	(11.7–12.3)	(18.2)	(17.8–18.5)	(5.6)	(5.4–5.8)	(8.4)	(8.1–8.7)	(26.2)	(25.8–26.6)
≥65	153,584	(6.6)	(6.3–6.9)	(9.9)	(9.5–10.2)	(27.4)	(27.0–27.9)	(5.3)	(5.1–5.5)	(9.8)	(9.5–10.1)	(35.5)	(35.0–36.0)

Fonte: Reagan-Steiner et al. (2013)⁴.

Deficiências de locomoção são definidas pela Organização Mundial da Saúde como dificuldades de andar ou deslocar-se, ou dificuldades de modificar ou manter a posição do corpo⁵. Tais dificuldades podem levar a pessoa a se tornar menos ativa e a reduzir sua participação social, o que resulta na piora da qualidade de vida e a deterioração da saúde. Assim, preservar a capacidade de locomoção dessas pessoas é importante também para evitar tais consequências indesejadas⁶.

Diversas soluções tecnológicas vêm sendo desenvolvidos para ajudar pessoas com deficiências de mobilidade. Muitas dessas soluções são dispositivos que visam devolver a essas pessoas a capacidade de locomoção, e é comum classificar tais dispositivos entre aumentativos e alternativos⁷. Dispositivos aumentativos são aqueles que utilizam as capacidades residuais de locomoção do usuário, e incluem bengalas, muletas, andadores, próteses e orteses. Já os dispositivos alternativos, cujo maior expoente são as cadeiras de rodas, possibilitam a locomoção de formas distintas do andar bípede sobre as pernas do usuário.

Em geral, é preferível a utilização de dispositivos aumentativos aos alternativos, uma vez que o uso de cadeiras de rodas está associado a complicações secundárias como úlceras de pressão, osteoporose, diabetes tipo 2 e problemas cardiovasculares⁸. No entanto, dispositivos aumentativos só podem ser prescritos para pessoas em condições de utilizá-los com segurança, uma vez que eles não são capazes de fornecer suporte físico completo (exceto em ambientes de reabilitação bastante controlados). Essa limitação fica clara quando se constata que o uso de bengalas e andadores está associado a um aumento na probabilidade de queda do usuário⁹.

O desenvolvimento de dispositivos aumentativos mais bem adaptados às necessidades de seus usuários é uma das maneiras de ajudar pessoas com deficiências de mobilidade. Com o avanço e o barateamento da eletrônica embarcada, torna-se bem mais viável incorporar a esses aparelhos sensores, atuadores e processadores eletrônicos, com o propósito de adicionar ou aprimorar funcionalidades. Um exemplo, que se encontra comercialmente disponível hoje em dia, são as chamadas “bengalas laser”, onde são montados transdutores laser para realizar certas tarefas: no caso de pessoas com Parkinson, é usado um laser visível para projetar uma faixa no chão, com o objetivo de fornecer uma meta visual para o próximo passo e, assim, evitar o congelamento de marcha¹⁰; no caso de pessoas com problemas visuais, é usado um laser invisível para detectar a distância do usuário até obstáculos, e essa informação é informada ao usuário (geralmente por vibração do cabo) ou usada para guiá-lo, com o uso de rodas¹¹. Outras exemplos de funcionalidades que poderiam ser realizadas por dispositivos assistivos são traçar rotas, monitorar parâmetros biológicos e detectar quedas¹².

Os andadores com rodas são uns dos dispositivos assistivos com maior potencial para aprimoramento com componentes eletrônicos e robóticos. Tais dispositivos podem ter suas rodas controladas por atuadores, sejam eles freios ou motores, possibilitando que o sistema embarcado auxilie mecanicamente na locomoção de seu usuário. É possível, por exemplo, evitar que o andador se afaste muito do usuário, provocando uma queda para frente – uma grande preocupação no caso de usuários sem grande coordenação motora para operar freios¹³. O fato de os andadores com rodas sustentarem seu próprio peso durante todo o ciclo de marcha permite ainda que uma quantidade maior de equipamento seja montada neles sem que a usabilidade do dispositivo seja muito comprometida.

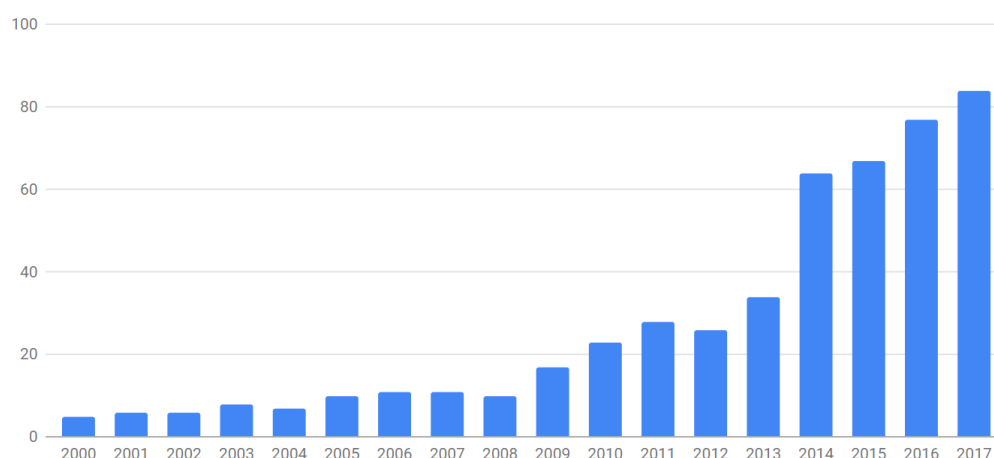
Andadores com eletrônica embarcada são denominados andadores inteligentes, ou *smart walkers*⁷. Esses aparelhos vêm sendo bastante estudados desde os anos 90,

quando os protótipos PAM-AID (*Personal Adaptive Mobility Aid*) – dispositivos robóticos de auxílio à locomoção – surgiram e culminaram em um produto comercial, o andador inteligente GUIDO¹⁴. Esse andador tinha como objetivo principal ajudar pessoas com deficiências de mobilidade e de visão e, para isso, utilizava sensores de distância e duas rodas-guia controladas por servomotores, para evitar colisões ou guiar seu usuário até o destino desejado. Apesar de estudos piloto promissores e boa recepção por parte dos usuários, o GUIDO não foi considerado comercialmente viável e foi retirado do mercado no início de 2002¹⁴.

Concomitantemente à evolução do PAM-AID, diversos outros protótipos de andadores inteligentes foram desenvolvidos, como o MARC Smart Walker¹⁵, o RT Walker¹⁶, o SIMBIOSIS¹⁷, o ASBGo¹⁸ e o UFES Smart Walker^{19,20}, esse último sendo o andador no qual foi desenvolvida a presente Dissertação de Mestrado. É possível perceber um aumento no interesse por andadores inteligentes nos últimos anos (ver Figura 2), o que parece indicar não só a relevância do tema, como também que os avanços tecnológicos ocorridos desde a descontinuação da versão comercial do GUIDO tornaram o desenvolvimento de um andador inteligente uma empreitada mais viável comercialmente.

Figura 2 – Número de resultados envolvendo o termo “*smart walker*” ao longo do tempo

Google Scholar Results for “smart walker”
2000 - 2018



Uma funcionalidade bastante promissora dos andadores inteligentes é o auxílio à navegação, que inclui diversas funções como localização em mapa e desvio de obstáculo. Esse tipo de função costuma ser motivada pela tentativa de ajudar pessoas com deficiências de visão e de mobilidade, que são os dois tipos de deficiências mais comuns entre idosos. No entanto, mesmo pessoas sem deficiências de visão podem se beneficiar de andadores com funções de navegação: sabe-se que a operação de dispositivos assistivos requer atenção e esforço cognitivo, de modo que a realização de tarefas concorrentes à operação do andador pode aumentar o risco de acidentes⁹. Dessa forma, um andador inteligente capaz de auxiliar a navegação de seu usuário poderia aliviar parte dessa carga cognitiva, sendo útil a pessoas com variados graus de função locomotora, cognitiva e visual.

Uma parte importante de uma estratégia de navegação é o desvio de obstáculos¹², que envolve a tentativa de evitar colisões de forma suave. Tais obstáculos podem

ser fixos ou móveis, e o desvio de obstáculos móveis é particularmente importante em um andador inteligente que acompanhe seu usuário em contextos sociais, em que esse interage e partilha o ambiente com outras pessoas. É essa área – o desvio de obstáculos móveis em andadores inteligentes – que a presente Dissertação pretende abordar, uma vez que a maioria das soluções encontradas na literatura não modela o movimento de obstáculos móveis.

1.2 Objetivos

Essa Dissertação de Mestrado tem como objetivo geral investigar, propor e implementar estratégias para desvio de obstáculos em andadores inteligentes, dedicando especial atenção à navegação do usuário num ambiente com outras pessoas e procurando uma interação confortável entre o usuário e o andador.

A realização do objetivo geral desse trabalho pode ser dividida nos seguintes objetivos específicos:

- Revisar bibliografia sobre andadores inteligentes, estratégias de navegação de robôs móveis, interfaces humano-robô e proxêmica (uso social do espaço);
- Implementar simulação física do UFES Smart Walker, com o uso do software GAZEBO disponível no sistema operacional para robótica ROS (do inglês *Robot Operating System*), para uso como plataforma de testes rápida;
- Implementar e avaliar, tanto em simulação quanto no andador real, estratégias de navegação presentes na literatura, buscando situações em que tais estratégias se comportam mal;
- Propor estratégias alternativas para que o andador lide melhor nas situações problemáticas identificadas no item anterior;
- Realizar testes no andador real (qualitativos) e no andador simulado (quantitativos) para avaliar as estratégias propostas, comparando-as com estratégias originais.

1.3 Justificativa

Estratégias de auxílio à navegação são um dos aspectos mais estudados dos andadores inteligentes, e estão intimamente relacionadas à função principal de um andador, que é o auxílio à locomoção. Já no início da década de 2000, protótipos como o PAMM²¹ e o MARC Smart Walker¹⁵ implementavam funções de parada de segurança, desvio de obstáculos e localização em um mapa pré-programado. Desde então, abordagens alternativas foram propostas, incorporando sensores como câmeras e LIDARs (*Light Detection and Ranging*), e técnicas como campos potenciais e SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*)^{16,22}. De acordo com o conhecimento do autor, não há no momento uma estratégia de auxílio à navegação cuja eficácia tenha sido comprovada em testes clínicos de larga escala, e uma análise conceitual aponta vantagens e desvantagens em todas as técnicas existentes, sem que uma delas seja claramente superior. Assim, a busca por

melhores estratégias de navegação no contexto de andadores inteligentes é justificável, e tais estratégias continuam sendo estudadas.

Algumas técnicas de auxílio à navegação em andadores inteligentes implementam o desvio de obstáculos. Isso é feito com técnicas frequentemente usadas para a navegação de robôs móveis, como os campos potenciais¹⁶, deformação reativa de caminhos^{14,23}, o histograma de campo vetorial (VHF – *Vector Field Histogram*)²⁴ e, mais recentemente, técnicas de janela dinâmica²⁵. No entanto, a presença de um usuário gera consideráveis distinções entre um robô autônomo e um andador inteligente: enquanto que um robô móvel autônomo é independente e tenta realizar uma tarefa pré-estabelecida, um andador inteligente deve sempre obedecer aos comandos de seu usuário e deve mover-se de forma confortável e segura para ele.

O processo de adaptar uma técnica de desvio de obstáculos para um andador inteligente envolve modificações que integrem o desvio de obstáculos à forma como o usuário interage com o andador. Uma possibilidade é estabelecer um caminho seguro e forçar o usuário a percorrê-lo, dando a ele somente a possibilidade de controlar a velocidade do andador¹⁴. Outra possibilidade é tentar guiar o usuário de forma sutil, com a aplicação de forças que podem ser resistidas. Esse segundo tipo de estratégia foi usado por Hirata, Hara e Kosuge (2004)¹⁶, e permite que a técnica de desvio tente realizar sua função sem retirar de seu usuário o controle sobre o caminho que o andador percorre. É nessa implementação que a proposta da presente Dissertação é baseada.

A presente Dissertação de Mestrado apresenta uma investigação sobre técnicas de desvio de obstáculos em andadores inteligentes que realizam a distinção entre obstáculos fixos e móveis, motivada pelo fato de que obstáculos móveis não foram abordados explicitamente na grande maioria das implementações de desvio de obstáculos presentes literatura^{14–16,26}. Conjecturou-se que a realização dessa distinção pode ser interessante em um contexto social, onde há pessoas – obstáculos móveis – partilhando o ambiente com o usuário do andador. Tais situações são de grande importância para andadores que tenham por objetivo aumentar a autonomia de seu usuário no dia-a-dia.

1.4 Organização do texto

A presente Dissertação foi dividida em 6 Capítulos. O presente Capítulo contém uma introdução sobre o tema da Dissertação. O Capítulo 2 contém uma revisão da literatura sobre dispositivos assistivos, andadores inteligentes e técnicas de desvio de obstáculos. O Capítulo 3 apresenta uma proposta de algoritmo para o desvio de obstáculos móveis em andador inteligente, descrevendo não somente como implementar o algoritmo, mas também as considerações que motivaram seu desenvolvimento. O Capítulo 4 descreve como o algoritmo proposto foi implementado, descrevendo tanto uma implementação em um andador inteligente físico quanto em simulação. O Capítulo 5 contém a descrição e os resultados de testes, comparando o algoritmo proposto no Capítulo 3 com técnicas já estabelecidas na literatura. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e aponta possíveis trabalhos futuros.

2 Embasamento teórico

Nesse capítulo, é apresentada uma visão geral da literatura relativa ao desvio de obstáculos em andadores inteligentes. Inicialmente, será abordado o tema de dispositivos assistivos para locomoção de um ponto de vista clínico e, a partir disso, serão descritos os andadores tradicionais e inteligentes. Mais adiante, a discussão terá foco em técnicas de robótica móvel, com ênfase em técnicas de desvio de obstáculos. O capítulo se encerra unindo esses dois temas com uma revisão das técnicas de desvio de obstáculos implementadas em andadores inteligentes presentes na literatura.

2.1 Dispositivos assistivos para locomoção

O termo “dispositivo assistivo” refere-se a dispositivos usados para “melhorar ou manter as capacidades funcionais de indivíduos com deficiências”²⁷. Como exemplo, é possível citar as capacidades funcionais de visão, audição, fala e locomoção, que são assistidas, respectivamente, por narradores de texto via OCR (*Optical Character Recognition*); aparelhos auditivos; sintetizadores de voz para comunicação alternativa; e bengalas e muletas.

A Figura 3 ilustra alguns dos dispositivos de assistência à locomoção mais relevantes clinicamente. São eles as bengalas, as muletas, os andadores ortopédicos, e as cadeiras de rodas. Ainda que todos esses dispositivos tenham o mesmo objetivo final, eles devem ser prescritos para pessoas com necessidades e capacidades distintas^{13,28}.

Figura 3 - Diversos tipos de dispositivos de assistência à locomoção: bengalas, muletas, andadores e cadeiras de rodas.



Fontes: Bradley e Hernandez (2011)²⁹ e EliteCare™.

As bengalas – ocasionalmente chamadas de bengalas ortopédicas em distinção às bengalas para deficientes visuais – podem ser usadas para compensar fraqueza (seja aliviando carga ou fornecendo impulso) em uma das extremidades inferiores do usuário ou para melhorar o equilíbrio de seu usuário, servindo de referência tátil para o controle da postura. É interessante destacar que o efeito de bengalas como

referência tátil parece ser mais relevante para o equilíbrio do usuário que a aplicação de força lateral estabilizante⁹. Bengalas são recomendadas principalmente para usuários com lesões ou artrite em uma das pernas, com fraqueza em uma das extremidades inferiores, e com ataxia sensorial (degeneração da propriocepção)¹³.

As muletas são usadas quando é necessário descarregar grande parte do peso do usuário, ou quando ambas as extremidades precisam de apoio. Diferentemente de bengalas, elas possuem apoios no antebraço ou axilas, e assim é possível a aplicação de forças muito maiores: enquanto o uso de bengala permite uma descarga de até 25% do peso do usuário, com uma ou duas muletas é possível descarregar até 80% ou 100% do peso do corpo, respectivamente¹³. No entanto, o uso de muletas exige certo grau de coordenação e condicionamento físico, e por isso, seu uso por idosos costuma ser evitado em favor de bengalas ou andadores²⁸. Muletas são geralmente usadas por pessoas com fraqueza ou espasticidade em ambas as pernas (causada, por exemplo, por paralisia cerebral)¹³.

Os andadores são dispositivos com uma base de apoio maior que muletas e bengalas, aumentando consideravelmente a estabilidade do usuário e possibilitando uma descarga até 100% do peso do corpo⁹. Entretanto, tais dispositivos são considerados mais intrusivos e incômodos³⁰. Os andadores são usados principalmente por pessoas com deficiências mais severas, nas quais o usuário precisa de apoio nos dois braços para se equilibrar, ou quando há a necessidade simultânea de estabilizar o usuário e descarregar boa parte de seu peso. Por serem o foco do presente trabalho, os diferentes tipos de andadores e seus casos de uso serão descritos detalhadamente nas seções seguintes.

Por fim, as cadeiras de rodas são uma opção em que a pessoa se encontra completamente apoiado no dispositivo assistivo, reduzindo bastante a possibilidade de queda. As cadeiras de rodas diferenciam-se dos dispositivos já citados por serem classificadas como dispositivos assistivos *alternativos*, ou seja, que proporcionem uma forma alternativa de seu usuário realizar a locomoção. Em contraste, bengalas, muletas e andadores são dispositivos *umentativos* – dispositivos que aumentam as capacidades residuais de seus usuários⁷. Por exigirem menos faculdades residuais de locomoção, cadeiras de rodas podem ser usadas de forma segura por um número muito maior de usuários que os demais dispositivos citados, mas isso não significa que ela deve ser recomendada a todos eles. Isso porque os dispositivos aumentativos promovem uma locomoção mais natural, evitando problemas associados ao uso de dispositivos alternativos tais como a atrofia de músculos e ossos das pernas, pior funcionamento de órgão abdominais e da circulação de fluidos no corpo, e o surgimento de úlceras de pressão e de infecções do trato urinário⁸. Tais complicações são tão relevantes que motivaram o desenvolvimento de cadeiras de rodas que suportam seu usuário em pé³¹, que costumam ser chamadas de cadeiras de rodas *stand-up*. A Figura 4 mostra uma cadeira de rodas desse tipo.

Figura 4 - Cadeira de rodas "stand up".

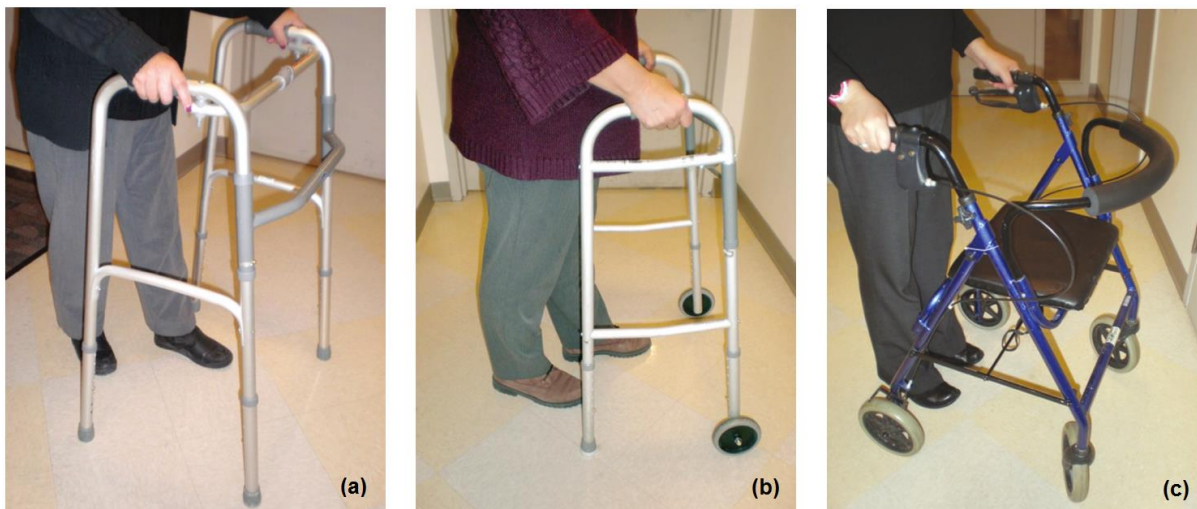


Fonte: JBH Wheelchair.

2.2 Andadores tradicionais

Os andadores tradicionais são dispositivos assistivos utilizados por pessoas com deficiências de mobilidade. Tais dispositivos são referidos na literatura de várias formas: “andadores adultos”, “andadores ortopédicos”, “*zimmer frames*”, “*walking frames*”, ou simplesmente “andadores”. Nesta Dissertação eles serão chamados de andadores tradicionais, como forma de contrastá-los aos andadores inteligentes. Os andadores tradicionais consistem essencialmente de uma armação que serve de apoio para seu usuário e faz contato com o solo em diversos pontos, geralmente com pés antiderrapantes ou rodas. A Figura 5 ilustra diversos tipos de andadores tradicionais.

Figura 5 – Alguns tipos de andadores tradicionais: convencional sem rodas, com rodas e pés, e com rodas



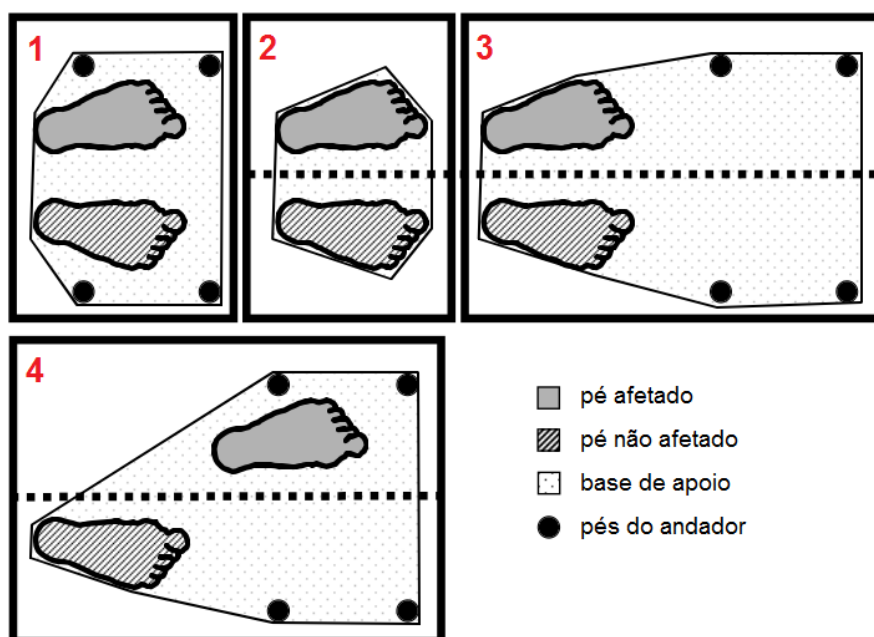
Fonte: Bradley e Hernandez (2011)²⁹.

A presença de diversos pontos de apoio espaçados torna os andadores tradicionais particularmente estáveis, especialmente se comparados com dispositivos como bengalas ou muletas. Assim, tais dispositivos fornecem uma base que seus usuários seguram com seus membros superiores. Essa base é usada como referência sensorial e como suporte físico, que serve para aliviar a carga nos membros inferiores do usuário (com forças verticais) e/ou para a aplicação de forças horizontais, com o objetivo de manter uma posição estável do centro de massa do usuário ou ainda iniciar ou parar certos movimentos da marcha⁹.

É possível classificar os andadores tradicionais em 4 categorias: há os andadores convencionais sem rodas (tipo *Zimmer*), os andadores com rodas e pés, andadores do tipo recíproco, e os andadores com rodas (tipo *rollator*)¹⁷. Tais andadores diferenciam-se na forma como tocam o chão e se deslocam por ele, afetando o ciclo de marcha de formas diferentes e, portanto, sendo indicados para pessoas com necessidades diferentes.

Os andadores sem rodas (Figura 5 (a)) são os mais estáveis, sendo apoiados por pés antiderrapantes. Tais andadores não devem deslizar sobre o chão durante sua operação, precisando ser erguidos durante o ciclo de marcha. A Figura 6 ilustra o ciclo de marcha durante a operação de um andador sem rodas, mostrando também a base de apoio – região onde o centro de massa do usuário pode estar localizado de forma estável – durante cada etapa do movimento. Essa necessidade de erguer o andador é a grande desvantagem desse tipo de dispositivo, uma vez que ela produz uma marcha menos natural, favorece o encurvamento da postura do usuário (em particular durante a etapa 3 da Figura 6), introduz uma etapa sem suporte do andador (etapa 2) e exige certa força nos membros superiores.

Figura 6 - Ciclo de marcha em um andador tradicional sem rodas



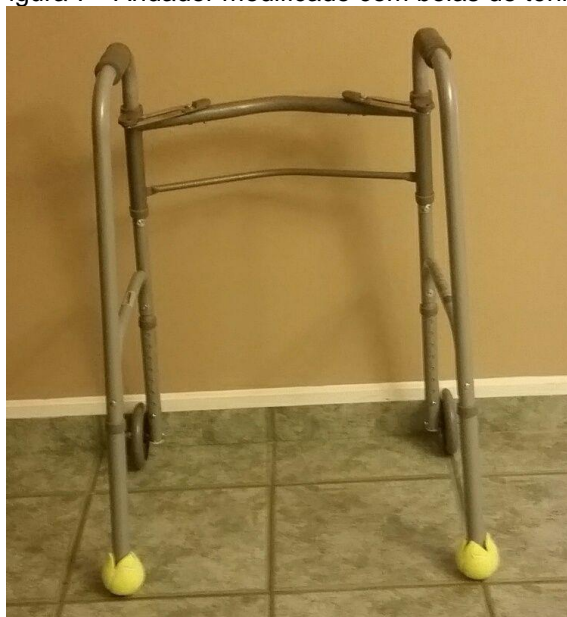
Fonte: Bateni e Maki (2005)⁹, modificado.

Os andadores com rodas e pés (letra (b) da Figura 5) geralmente possuem rodas em vez de pés antiderrapantes na parte dianteira, de modo que não é necessário erguer

o andador completamente do chão durante sua operação. Tais andadores permitem um ciclo de marcha mais natural e assim exigem menos esforço para serem operados, mas têm como desvantagem uma menor estabilidade que os andadores sem rodas e exigem um maior raio de curvatura. Andadores com rodas dianteiras são particularmente indicados para pessoas com parkinsonismo, que apresentam dificuldades em operar andadores sem rodas porque que tais dispositivos tendem a causar o congelamento de marcha⁹.

É interessante destacar aqui uma solução improvisada com certa popularidade: a instalação de bolas de tênis nos pés dianteiros de andadores, mostrada na Figura 7. Essa modificação, pouco abordada na literatura, é feita para permitir que o andador deslize mais facilmente sobre o chão, exigindo uma menor aplicação de força pelos membros superiores do usuário para deslocar o andador horizontalmente. No entanto, naturalmente, perde-se parte da estabilidade obtida com o uso de apoios antiderrapantes presentes em andadores sem rodas convencionais³². A existência dessa modificação é ilustrativa das dificuldades que os usuários enfrentam para erguer o andador.

Figura 7 - Andador modificado com bolas de tênis.



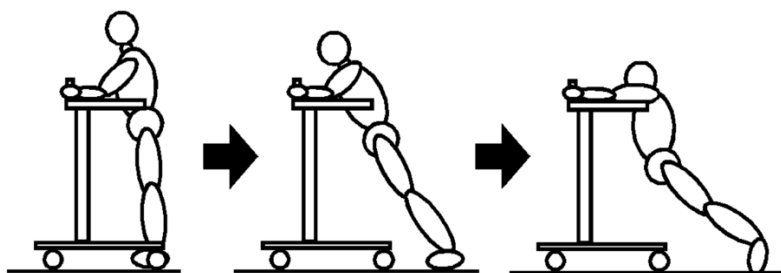
Fonte: <http://www.instructables.com/id/DIY-Tennis-Balls-On-Orthopedic-Walker/>

Os andadores do tipo recíproco assemelham-se ao andador tipo *Zimmer*, mas, nesse caso, as duas metades do andador são acopladas de forma a permitir certo movimento independente. Assim, durante metade do ciclo de marcha, metade do andador permanece apoiada no chão, auxiliando no suporte do usuário, enquanto a outra se move com a perna correspondente. Na literatura clínica^{9,13,29}, tais andadores frequentemente não são mencionados, talvez em razão de sua menor popularidade³³, ou porque em muitos modelos o movimento independente das metades do andador é bastante restrito e, portanto, não se diferencia muito de um andador sem rodas convencional – esse é o caso do andador na Figura 5 marcado com a letra (a).

Por fim, andadores com rodas são aqueles totalmente suportados por rodas (letra (c) da Figura 5). Esses andadores permitem um movimento mais natural pois não preci-

sam ser erguidos para que ocorra deslocamento horizontal. Dessa forma, tais andadores exigem menos esforço físico para serem operados, e permitem que seus usuários atinjam velocidades maiores ao caminhar³⁴. No entanto, esse tipo de andador pode rolar para frente de forma descontrolada quando é aplicada uma força para frente, e por isso é necessário que o usuário opere freios para locomover-se (ver a Figura 8)¹³. Essa necessidade restringe os usuários possíveis desse tipo de andador a indivíduos com suficiente acuidade mental e coordenação motora.

Figura 8 - Queda para frente em andador com rodas.



Fonte: Kai et al. (2004)³⁵

2.3 Andadores inteligentes

Andadores inteligentes (*smart walkers*) serão aqui definidos como dispositivos com uma base similar ao de um andador tradicional, ao qual são incorporados sensores, atuadores e eletrônica embarcada, com o objetivo de adicionar funcionalidades e assim melhor atender a seus usuários¹². Com a adição desses equipamentos a um andador tradicional, é possível que o andador consiga realizar tarefas como, por exemplo, acionar freios automaticamente para evitar colisões ou quedas, monitorar parâmetros biológicos de pacientes (e alertar médicos e cuidadores em emergências), e guiar o usuário até um destino desejado.

Os primeiros dispositivos a se enquadrar bem no conceito de andadores inteligentes surgem na literatura a partir da segunda metade da década de 90, com os protótipos PAM-AID (Personal Adaptive Mobility AID)^{36,37}, ilustrados na Figura 9. Tais protótipos consistem em uma variedade de “dispositivos robóticos de auxílio à mobilidade”, e seu amadurecimento resultou nos dispositivos PAMM (*Personal Aid for Mobility and Monitoring*) SmartCane e PAMM SmartWalker²¹. Esses dispositivos, que se assemelham, respectivamente, a uma bengala e um andador tradicional, tinham como principal objetivo auxiliar idosos a se deslocar em casas de retiro, guiando-os, fornecendo-lhes suporte físico e monitorando sua segurança durante o percurso, sem a necessidade da atenção total de um cuidador. Para isso, esses dois protótipos contavam com rodas motorizadas, sensores de força nos apoios usados pelo usuário (para detectar intenção de movimento), sensores de distância para detecção de obstáculos, e câmeras apontadas para o teto, usadas para localizar o dispositivo em um mapa do ambiente com o uso de marcadores.

Figura 9 - Bengala e andador inteligente PAMM

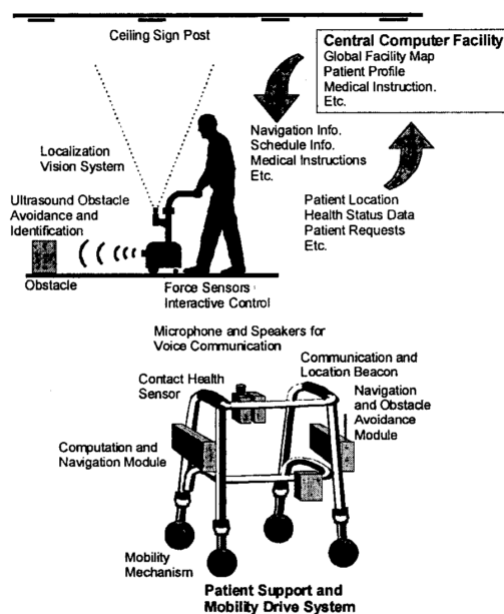


Figure 1. PAMM System Concept.

Fonte: Dubowsky et al. (2000)²¹.

Nos anos seguintes surge uma grande variedade de protótipos de andadores inteligentes, mostrada na Figura 10. Serão destacados o MARC Smart Walker¹⁵, no qual diversas estratégias de controle partilhado foram testadas; o RT Walker¹⁶, no qual estratégias de segurança como desvio de obstáculos e prevenção de quedas foram implementadas usando somente freios; o GUIDO¹⁴, um andador comercial baseado no PAMM Walker que foi descontinuado; o SIMBIOSIS¹⁷, no qual a intenção de movimento do usuário é inferida com sensores de força após remoção dos efeitos periódicos de marcha; o ASBGo¹⁸, que utiliza sensores apontados para o usuário para monitorar parâmetros biomecânicos da marcha, para fins de diagnóstico e reabilitação³⁸; e o UFES Smart Walker^{19,20}, o protótipo no qual a presente Dissertação foi desenvolvida, no qual técnicas de fusão sensorial e controle são utilizadas para o desenvolvimento de uma interface humano-robô para promover o comando natural do dispositivo.

A grande maioria dos andadores inteligentes encontrados na literatura é baseada nos andadores convencionais com rodas. Isso provavelmente se deve a duas grandes vantagens desse tipo de dispositivo em relação às alternativas sem rodas: em primeiro lugar, esse tipo de andador suporta seu próprio peso durante todo o ciclo de marcha, e assim é possível adicionar componentes pesados como baterias e motores ao andador sem comprometer muito sua usabilidade, uma vez que o usuário não precisará erguê-los. Em segundo lugar, o fato desse tipo de andador se apoiar em rodas permite que se faça uso de atuadores para rodas, como motores ou freios elétricos.

Figura 10 - Protótipos de andadores na literatura: MARC Walker (a), RT Walker (b), GUIDO (c), SIMBIOSIS (d), ASBGo (e), e UFES Smart Walker (f).



Fontes: Wasson et al. (2001)¹⁵, Hirata, Hara e Kosuge (2007)³⁹, Lacey e Rodriguez-Losada (2008)¹⁴, Frizera et al. (2008)¹⁷, Martins et al. (2015)¹², Valadão et al. (2014)¹⁹.

2.3.1 Atuadores

Andadores inteligentes diferenciam-se pela forma como utilizam atuadores para afetar o deslocamento de seu usuário. Tais atuadores permitem que o andador auxilie a marcha de seu usuário, complementando sua força, suavizando seu movimento, freando-o em caso de colisões iminentes ou conduzindo-o de forma a desviar de obstáculos¹². A maioria dos andadores inteligentes presentes na literatura faz o uso de motores ou freios para interferir na locomoção de seu usuário, mas nem todos: duas das exceções são os andadores descritos por Postolache et al. (2015)⁴⁰ e Wachaja et al. (2016)⁴¹. O primeiro consiste em um andador inteligente cuja função é o monitoramento da marcha do usuário, com o propósito de fornecer métricas para acompanhar o processo de reabilitação, e o segundo é um andador para cegos que informa seu usuário da necessidade de se desviar de obstáculos por vibrações nos apoios de mão do andador.

Alguns andadores utilizam motores nos eixos de suas rodas, sendo capazes de iniciar a parar seu movimento sem que seu usuário o empurre. Geralmente, tais motores precisam ser capazes de aplicar altos torques nas rodas do andador, mas com baixas velocidades, o que favorece o uso de reduções com grande fator de marcha

e motores CC. Um exemplo de andador inteligente assim é o UFES Smart Walker, mostrado na Figura 10 (f), que contém duas rodas motorizadas traseiras independentes, e uma roda castor dianteira. Nesse arranjo, é possível analisar tal andador sob a ótica de um robô móvel tipo unicycle – um robô capaz de se deslocar para frente e para trás, de rodar em torno de seu próprio eixo e de descrever arcos, mas incapaz de se deslocar lateralmente. Caso o deslocamento lateral seja considerado necessário, é possível ainda o uso de rodas omnidirecionais⁴².

Em contraste aos andadores com motores em seus eixos, alguns andadores não são capazes de iniciar o movimento sozinhos. Tais andadores, denominados passivos por alguns autores¹⁶, empregam freios ou têm rodas cuja direção é controlada por servomotores, e assim podem induzir frenagens e curvas. Deve-se destacar aqui que os andadores com rodas direcionáveis podem ser freados ao posicionar os eixos de forma não paralela¹⁴, e andadores com freios podem realizar curvas ao frear somente um de seus lados. Naturalmente, andadores passivos não oferecem tanto controle sobre seu movimento quanto os ativos, pois funções como manter uma velocidade constante – útil para pessoas com Parkinson que sofrem congelamento de marcha³⁵ – não são possíveis. No entanto, a atuação passiva é apontada como possivelmente vantajosa por ser intrinsecamente segura e intuitiva¹⁶. Outra vantagem de andadores passivos é que seus atuadores geralmente têm tamanho e peso reduzidos e consomem menos energia, o que permite a construção de andadores inteligentes mais leves e com maior autonomia até que seja necessário recarregar suas baterias.

2.3.2 Sensores

Andadores inteligentes diferenciam-se também pelos tipos de sensores presentes. Serão citados à frente alguns sensores utilizados nesses andadores.

Sensores de distância são comuns para a detecção de obstáculos. Hoje em dia, LIDARs e câmeras RGBD (RGB com profundidade - *Depth*) são os sensores mais populares para esse tipo de tarefa^{22,41}, mas sensores ultrassônicos e de toque já foram usados com esse propósito¹⁴. Sensores de distância também podem ser apontados para o usuário do andador para a medição de parâmetros como a posição das pernas³⁸ ou do tronco do usuário⁴³.

Sensores de odometria incluem encoders em rodas e unidades de medição inercial (IMUs), e tem por objetivo fornecer medidas do movimento do andador no ambiente. Esses sensores são necessários para fechar uma malha de controle cinemático, e também são úteis em tarefas de navegação. As IMUs podem ainda ser usados para compensação dos efeitos da gravidade em rampas^{39,44}, e os sensores de odométricos podem ser usados para um monitoramento do nível de atividade do usuário do andador⁴⁰.

Sensores de força são bastante empregados nos pontos de apoio do usuário para medir as forças de interação entre ele e o andador. Tais forças podem ser usadas para tentar estimar as intenções de movimento do usuário e assim fornecer uma interface de controle intuitiva²⁰. As leituras dessas forças também têm função diagnós-

tica, fornecendo dados sobre a marcha do usuário e identificando situações potencialmente perigosas⁴⁰.

Por fim, sensores de batimentos cardíacos e de saturação de oxigênio permitem um monitoramento de parâmetros cardiorrespiratórios do usuário, podendo ser usados para monitoramento de longo prazo do usuário ou detectando situações de exaustão do usuário durante uma tarefa de reabilitação.

2.3.3 Computador embarcado

A presença de um computador embarcado no andador inteligente é necessária para o processamento (ou ao menos transmissão e/ou armazenamento) dos dados obtidos. Esse computador determina a resposta adequada de acordo com a estratégia programada, acionando atuadores, informando o usuário, ou alertando agentes externos como uma equipe médica. Quando a estratégia utilizada no andador é simples – por exemplo, um loop de controle com poucas entradas – não há grandes exigências de poder computacional. No entanto, sensores como câmeras RGBD e LIDAR produzem um grande volume de dados, aos quais são aplicáveis técnicas de processamento mais elaboradas – e computacionalmente custosas, vindas de áreas como o processamento de imagens, robótica probabilística ou SLAM. Com a popularização desse tipo de sensor, parece ser possível apontar uma tendência de aplicação de técnicas cada vez mais elaboradas de processamento de sinais em andadores inteligentes, exemplificada pelos trabalhos de Chalvatzaki et al. (2014)⁴⁵ e Pantelelis et al. (2015)²². Tal tendência favorece o uso de processadores mais poderosos e arquiteturas de software mais elaboradas, e é uma das motivações para trabalhos como o de Mello (2018)⁴⁶, que tenta inserir o andador em uma arquitetura em nuvem, possibilitando o acesso ao poder computacional de servidores.

2.4 Navegação de robôs móveis

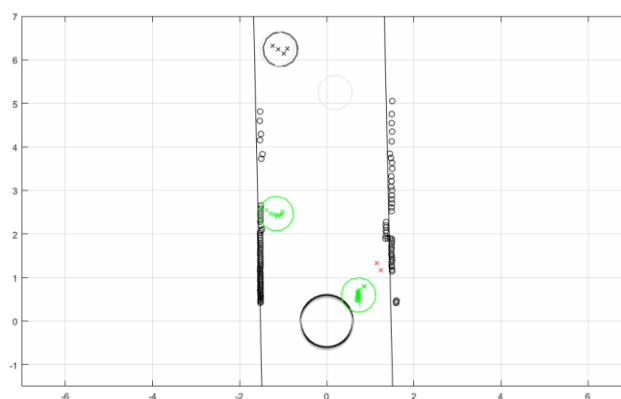
2.4.1 Visão geral

O conceito de navegação é bastante amplo, podendo ser definido como a tarefa de “se deslocar entre lugares de forma robusta, interpretando dados, se localizando e controlando seu movimento ao longo do percurso”⁴⁷. Por sua complexidade, é natural dividir a navegação em subtarefas relativamente independentes como a localização em um mapa, o planejamento de caminho, ou a detecção e desvio de obstáculos. Algumas dessas subtarefas serão descritas agora.

O **controle de movimento**, ou controle cinemático, envolve o acionamento dos atuadores do robô para que esse percorra uma trajetória desejada. Para isso, é utilizado um modelo cinemático ou dinâmico do robô, que depende de suas características mecânicas como tipo e disposição de atuadores, massa e momento de inércia do robô e torques máximos. Essa tarefa geralmente é realizada em uma estrutura de controle de malha fechada, utilizando sensores para detectar desvios da trajetória desejada e aplicar a ação corretiva⁴⁷. Em robôs teleoperados, essa pode ser a única função de navegação realizada pelo robô.

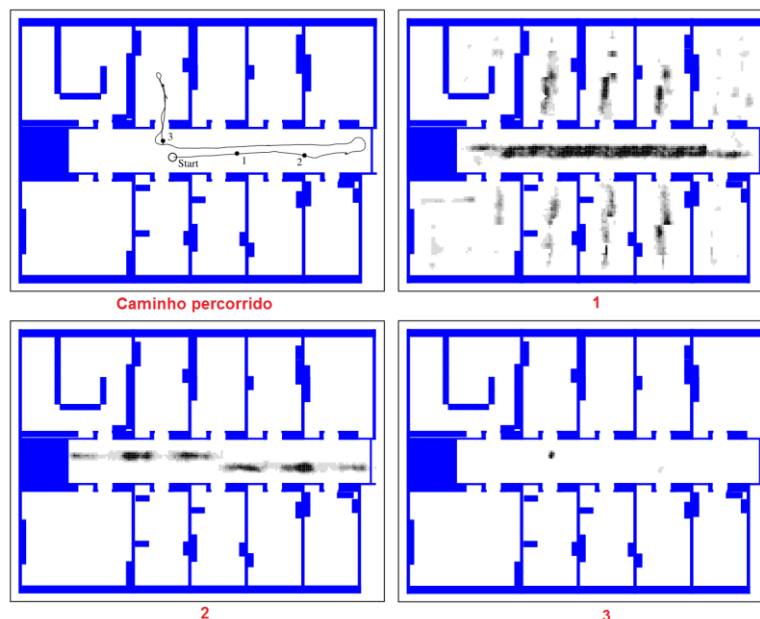
A **detecção de obstáculos** envolve o uso de sensores para encontrar entidades que podem obstruir o deslocamento do robô. Para isso, costumam ser usados sensores de varredura a laser (LIDAR)¹⁶, câmeras²² ou sensores de toque¹⁴. A detecção de um obstáculo é o primeiro passo para outras tarefas envolvendo obstáculos, que serão descritas a seguir. A **parada de segurança**¹⁵ consiste em tentar parar o movimento do robô caso se detecte que ele se envolverá em uma colisão com obstáculos, e o **desvio de obstáculos**⁴⁸ consiste em modificar, de preferência o mínimo possível, a trajetória do robô para evitar colisões com obstáculos detectados. É importante destacar que o tratamento de obstáculos móveis costuma ser consideravelmente mais complicado que o tratamento de obstáculos fixos^{49,50}. A tarefa de identificar que um obstáculo é móvel será denominada **detecção de obstáculo móvel**, e o acompanhamento de um obstáculo móvel entre diferentes leituras do sensor que o detecta é denominado **tracking de obstáculo móvel**. A Figura 11 ilustra a detecção e *tracking* de obstáculos móveis com o uso de um LIDAR.

Figura 11 - Ilustração de técnica de detecção e tracking de obstáculos móveis. Os pontos obtidos pelo LIDAR são agrupados em paredes (linhas pretas), obstáculos fixos (círculo preto) e obstáculos móveis (círculos verdes).



A tarefa de **localização** consiste em encontrar a pose do robô em relação um mapa⁴⁹. Esse mapa pode ser um mapa completo do ambiente, conhecido *a priori*, mas pode também ser um mapa local, contendo objetos recentemente detectados pelos sensores do robô⁴⁹. A localização é feita a partir de sensores que dão medidas absolutas da posição do robô (como GPS), da integração dos sensores de odometria do robô, e de sensores que podem detectar estruturas do ambiente presentes no mapa – é interessante considerar objetos facilmente reconhecíveis, denominados *landmarks*. Informações sobre a posição e odometria do robô em tempos anteriores também são de grande importância para o problema de localização porque robôs reais se movem de forma contínua e com velocidades limitadas, sem saltos arbitrários de posição⁴⁹. A Figura 12 ilustra o progresso de um algoritmo de localização.

Figura 12 - Localização a partir de filtro de partículas. Conforme o robô recebe leituras do ambiente, sua estimativa de posição no mapa melhora.



Fonte: Thrun, Burgard e Fox (2005)⁴⁹.

O problema da localização pode ser dividido em três casos, progressivamente mais difíceis⁴⁹. No caso de *tracking de posição*, assume-se que o robô sabe sua posição inicial, de modo que a tarefa de localização consiste na correção de erros relativamente pequenos de odometria. No caso da *localização global*, o robô não conhece sua posição inicial, e assim não é possível restringir o espaço de busca às proximidades da posição anterior. Já no *problema do robô sequestrado (kidnapped robot problem)* assume-se que o robô é teletransportado, sem seu conhecimento, durante sua operação. Nesse caso, o robô deve ser capaz de perceber que sua estimativa de localização não é mais válida. Esse último caso é interessante por avaliar a capacidade de um robô recuperar-se de eventuais erros em seus algoritmos de localização.

O **mapeamento** consiste na construção de um mapa do ambiente a partir das leituras de sensores⁴⁹. Esse problema é intimamente relacionado ao problema de localização porque quando esses sensores detectam um novo objeto, estes o fazem de forma relativa à pose atual do robô. Assim, não é possível saber onde inserir um objeto recém detectado no mapa sem que se saiba onde o robô se encontra nesse mapa. O problema combinado de localização e mapeamento é denominado SLAM, e é de grande interesse para o desenvolvimento de robôs autônomos⁵¹. Quando se deseja realizar o SLAM em um ambiente com muitos obstáculos móveis, podem ser necessárias técnicas denominadas SLAMMOT (*SLAM + Moving Object Tracking*)⁵².

Finalmente, o **planejamento de caminho** envolve encontrar um caminho adequado entre a posição atual do robô e um destino desejado⁴⁷. Esse planejamento é realizado com base no mapa do ambiente, e geralmente é feito com o uso de técnicas da teoria de grafos.

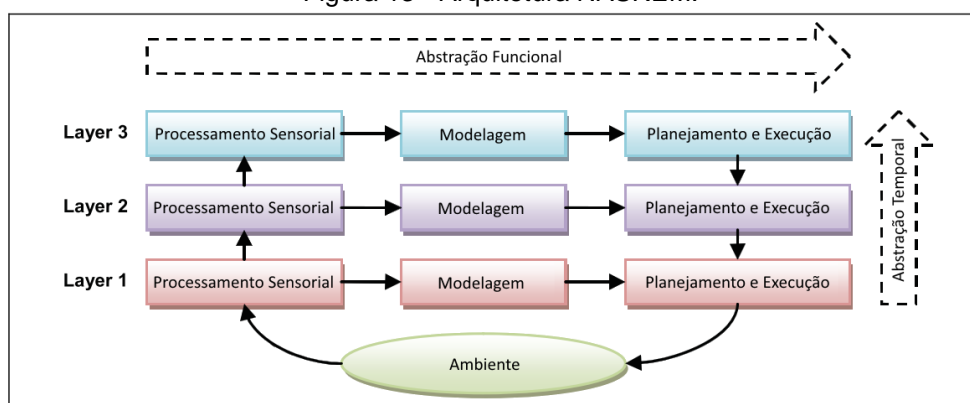
2.4.2 Arquiteturas de controle de navegação

Uma estratégia de navegação pode combinar diversas técnicas elaboradas para resolver uma das subtarefas citadas na seção anterior. Nesse caso, é necessário integrar essas diferentes técnicas em uma arquitetura de controle⁵³. Tradicionalmente, isso é feito separando a navegação em módulos funcionais que interagem em sequência⁵⁴: percepção (*perception*), modelagem (*modelling*), planejamento (*planning*), execução de tarefa (*task execution*) e controle motor (*motor control*).

Segundo Silas et al. (2011)⁵³, arquiteturas do tipo tradicional, nas quais o robô tenta alcançar seus objetivos executando planos elaborados a partir de um modelo unificado do mundo, são denominadas arquiteturas deliberativas. Em contraste existem as arquiteturas baseadas em comportamentos (*behavioral architectures*), nas quais a estratégia de navegação é constituída de comportamentos relativamente independentes (como parada de emergência, desvio de obstáculos, seguir caminho até a meta) e executados de modo modular. Arquiteturas baseadas em comportamentos permitem a fácil integração de diversos objetivos e tendem a produzir estratégias de controle com tempos de resposta rápidos, mas não são um bom modelo quando são necessários mecanismos complexos de arbitração entre os diferentes comportamentos – nessas arquiteturas, essa arbitração é realizada com técnicas como o uso de médias ponderadas ou de uma lista de prioridades⁵⁴. Silas et al. (2011)⁵³ reconhece ainda arquiteturas de controle mistas, que combinam técnicas deliberativas e baseadas em comportamentos.

Outro tipo de arquitetura relevante é a NASREM (NASA/NBS *Standard Reference Model Architecture*)⁵⁵, que divide as tarefas do robô em camadas, e se encontra ilustrada na Figura 13. Nessa arquitetura, camadas superiores realizam um planejamento de alto nível e longo prazo do que o robô fará, enquanto que as camadas inferiores garantem a realização de tarefas de curto prazo que compõem os objetivos determinados pelas camadas superiores. Assim, as camadas superiores utilizam técnicas de deliberação mais complexas e preditivas, enquanto que as camadas inferiores realizam um processamento mais reativo. Esse tipo de organização também é interessante no desenvolvimento de sistemas de tempo real, pois as camadas têm seus tempos de resposta bem definidos, e os algoritmos mais complexos (e lentos) podem ser concentrados nas camadas superiores da arquitetura.

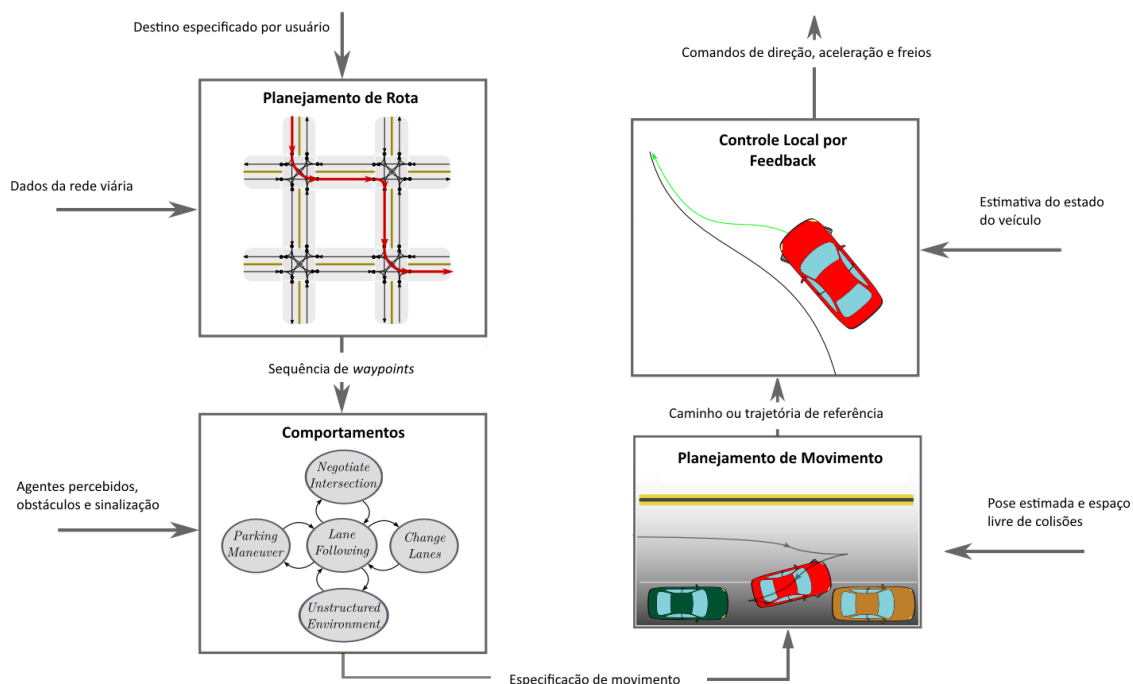
Figura 13 - Arquitetura NASREM.



Fonte: Silas et al. (2011)⁵³, traduzida.

É possível ainda apontar uma arquitetura hierárquica comum a veículos autônomos, descrita por Paden et al. (2016)⁵⁶. Essa arquitetura separa a estratégia de navegação em quatro camadas: planejamento de rota, camada de comportamentos (*behavioral*), planejamento de movimento e sistema de controle. Nesse caso, a camada de comportamentos acaba tendo uma função deliberativa, determinando qual comportamento o veículo deve ter no momento, e assim determinando o que a camada de planejamento de movimento deve considerar ao escolher entre as trajetórias possíveis. A Figura 14 ilustra esse tipo de arquitetura.

Figura 14 - Arquitetura de controle de carro autônomo.



Fonte: Paden et al. (2016)⁵⁶, modificada e traduzida.

2.4.3 Desvio de obstáculos em robôs móveis

Nessa seção, serão descritas algumas técnicas de desvio de obstáculos para robôs móveis. Nessa descrição será dada ênfase às estratégias com aplicação a andadores inteligentes.

Uma técnica bastante simples de desvio de obstáculos consiste em simplesmente contorná-los. Esse tipo de estratégia envolve o uso de sensores de colisão ou de distância para detectar obstáculos próximos do robô, para então modificar o caminho sendo percorrido de modo a acompanhar o contorno do obstáculo que obstrui o caminho, em geral procurando manter uma distância constante desse. Essa técnica é tão simples que dificilmente é mencionada individualmente na literatura, sendo usada como parte de algoritmos de navegação como o BUG⁵⁷.

A técnica de campos potenciais, ilustrada na Figura 15, consiste originalmente em navegar o robô como se ele estivesse sujeito a forças atrativas e repulsivas conservativas, que repelem o robô de obstáculos e o atraem para sua meta⁵⁸. Nessa técnica,

ca, são definidos os campos escalares U_{goal} e U_{obst} , que têm funções de guiar o robô a sua meta e induzi-lo a desviar de obstáculos, respectivamente. O valor do campo U_{goal} decresce com a distância até a meta (localizada em \vec{r}_{goal}), enquanto que o campo U_{obst} tem valor 0 em um espaço livre de obstáculos, e aumenta conforme a menor distância até um obstáculo (definida pela função d_{obst}) é reduzida. Considera-se então que o robô, localizado em \vec{r} , está sujeito a um campo $U(\vec{r})$, que é a soma desses dois campos, e portanto sofre uma força $\vec{F}(\vec{r})$:

$$\vec{F}(\vec{r}) = -\nabla U(\vec{r}) \quad (2.1)$$

$$U(\vec{r}) = U_{goal}(\vec{r}) + U_{obst}(\vec{r}) \quad (2.2)$$

$$U_{goal}(\vec{r}) = f(|\vec{r} - \vec{r}_{goal}|) \quad (2.3)$$

$$U_{obst}(\vec{r}) = g(d_{obst}(\vec{r})) \quad (2.4)$$

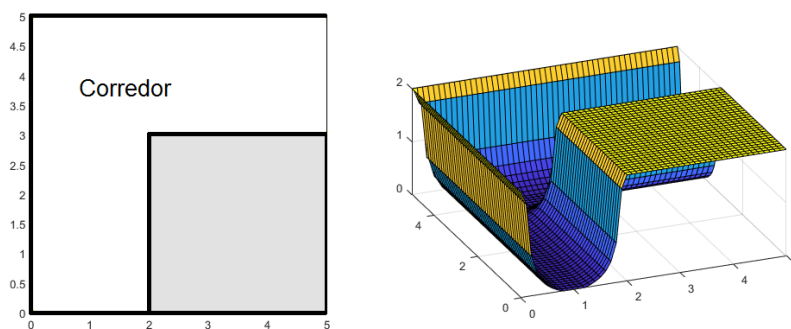
O comportamento desejado do campo potencial depende de certas restrições às funções f e g . Para garantir que $U_{goal}(\vec{r})$ sempre produza uma força que aponta para a meta, a função f deve ser contínua e decrescente. O campo $U_{obst}(\vec{r})$, por sua vez, deve produzir uma força que aponte para longe do obstáculo mais próximo, o que implica que a função g deve ser contínua e não crescente. É interessante ainda que g tenha uma distância máxima de atuação d_{MAX} , a partir da qual o obstáculo não produz campo repulsivo, e que o valor de g tenda a infinito conforme a distância até o obstáculo se aproxima de 0, de modo que uma energia infinita seria necessária para que o robô se deslocasse para um ponto onde há um obstáculo, evitando assim que ocorram colisões. Khatib (1986)⁵⁸ cita como sugestões as seguintes funções:

$$f(x) = \frac{1}{2} \cdot k_p \cdot x \quad (2.5)$$

$$g(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{d_{MAX}} \right), & x < d_{MAX} \\ 0, & x \geq d_{MAX} \end{cases} \quad (2.6)$$

Uma grande vantagem da técnica de campos potenciais sobre o simples contorno de obstáculo é que a trajetória do robô em torno de obstáculos costuma ser suavizada, uma vez que o campo repulsivo cresce gradualmente conforme a distância até o obstáculo diminui. Para que isso ocorra, no entanto, a escolha da função g é crítica porque ela determina a distância em que ação de desvio será iniciada e o quanto a força de desvio muda conforme o obstáculo se aproxima. Geralmente g é escolhida de forma que essa força cresça em módulo conforme o obstáculo se aproxima, o que implica não somente $g'(x) \leq 0$, mas também $g(x)'' < 0$ no intervalo relevante.

Figura 15 - Campos potenciais.

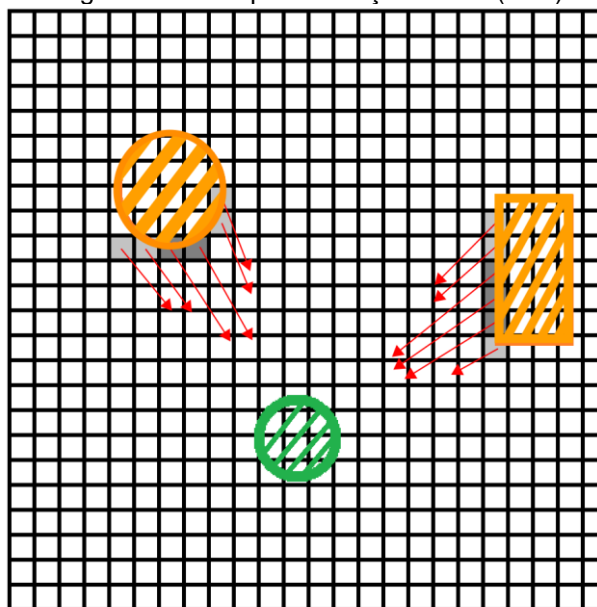


A técnica de campos potenciais teve grande impacto na literatura, especialmente como técnica de desvio de obstáculos. Por sua relativa simplicidade, essa técnica pode ser incorporada em uma arquitetura de controle de navegação como uma solução local, reativa e de tempo real para desviar de obstáculos recém-detectados – nesse caso, só é considerado o campo U_{obst} . Como técnica de planejamento de caminho em um mapa, no entanto, a técnica de campos potenciais é bastante limitada, sendo suscetível a ficar presa em mínimos locais⁵⁹.

As técnicas de campo de forças virtuais (VFF – *Virtual Force Field*)⁵⁹ e histograma de campo vetorial (VFH – *Vector Field Histogram*)⁶⁰ podem ser consideradas sucessoras da técnica de campos potenciais. Em ambas, o ambiente em torno do robô é modelado como uma grade discreta na qual cada célula contém um valor de ocupação. Os valores das células da grade são atualizados por leituras dos sensores de distância do robô, de forma que eles expressam a confiança que se tem de que cada célula se encontra ocupada ou desocupada – tal abordagem é denominada grade de certeza (*certainty grid*)⁶⁰. Esse tipo de representação contém um mapa do ambiente, permitindo um certo grau de persistência na representação dos obstáculos detectados e amenizando erros de leitura.

Na técnica de campo de forças virtuais, considera-se que cada célula ocupada (o que, nesse contexto, significa cada célula com probabilidade de estar ocupada) gera uma força de repulsão que decai com a distância, e que o robô se encontra sob ação de uma força virtual que é a soma das forças de todas as células. A distinção desse tipo de técnica em relação aos campos potenciais é que a ação de todos os obstáculos é combinada, enquanto que nas técnicas de campos potenciais apenas os obstáculos mais próximos são relevantes. Isso permite uma ação mais suave na presença de múltiplos obstáculos, mas existe a possibilidade de que um obstáculo grande (que ocupa mais células e produz mais repulsão) produza uma força que aponta na direção de um obstáculo menor. A VFF é ilustrada na Figura 16.

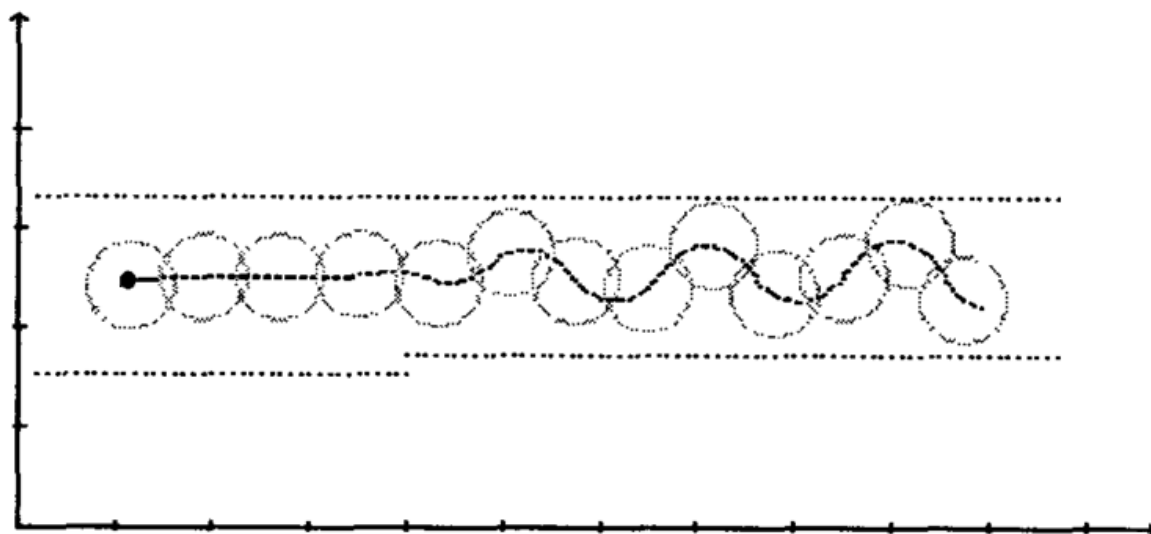
Figura 16 - Campos de força virtuais (VFF).



É possível citar algumas desvantagens nos métodos de campos potenciais e VFF⁶⁰. Uma delas é a presença de oscilações em corredores, que pode ocorrer quando o desvio de uma parede do corredor coloca o andador em rota de colisão com a outra parede (ver Figura 17). Outra desvantagem é que tais métodos podem impedir a passagem por locais estreitos como portas, pois ainda que o caminho à frente do robô esteja livre, as paredes nos lados da porta ainda produzem repulsão. Para lidar com esses problemas, a técnica de histograma de campo vetorial (VFH) tenta identificar, em relação à posição atual do robô, direções livres de obstáculos. Isso é feito a partir de um histograma que soma os valores das células ocupadas em cada direção, conforme mostrado na Figura 18. Direções relativamente livres de obstáculos são consideradas candidatas, e uma delas é escolhida como direção desejada para o robô (a forma como uma das direções livres é escolhida varia dependendo da implementação do VFH. Por exemplo, é possível escolher a direção mais próxima da meta global ou a direção mais próxima da orientação atual do robô). Em contraste às duas técnicas anteriores, que produzem uma força de desvio, a técnica VFH tem como resultado uma direção desejada.

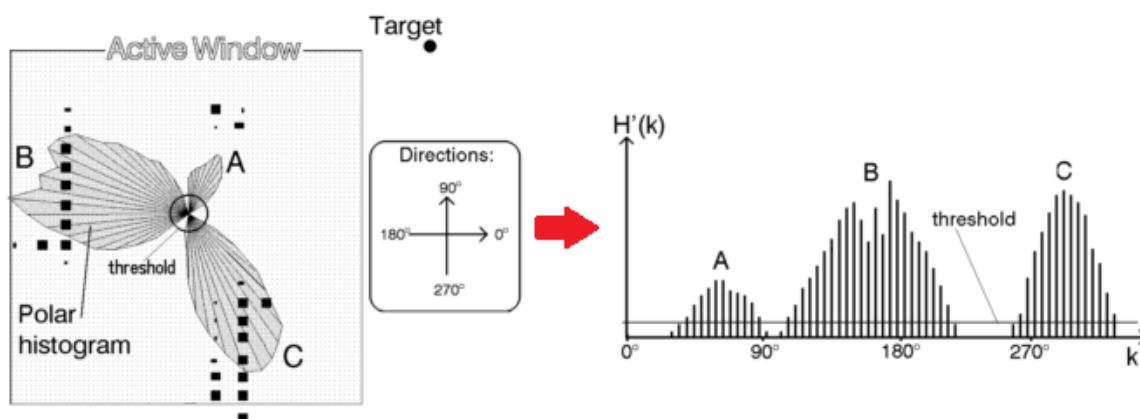
A maior parte dos avanços recentes no desvio de obstáculos não são baseados em campos potenciais ou em seus sucessores, e sim em técnicas que serão denominadas, nessa Dissertação, de técnicas de janela dinâmica^{61,62}. Em vez de se produzir um vetor ou direção a partir da disposição dos obstáculos, tais as técnicas de janela dinâmica realizam uma busca da melhor trajetória no espaço de trajetórias possíveis^{56,61}. A decisão sobre a melhor trajetória costuma ser feita com o uso de uma função custo, que pode incorporar diversos parâmetros como distância até obstáculos, esforço de controle, distância total percorrida e distância até a meta. Para explorar o espaço de trajetórias possíveis de forma eficiente, as técnicas de janela dinâmica fazem uso de técnicas de processamento paralelo, busca e otimização⁵⁶. Uma ilustração dessa técnica, onde diversas trajetórias futuras possíveis são mostradas, pode ser vista na Figura 19.

Figura 17 - Oscilação provocada por campos potenciais.



Fonte: Koren e Borenstein (1991)⁵⁹, modificada.

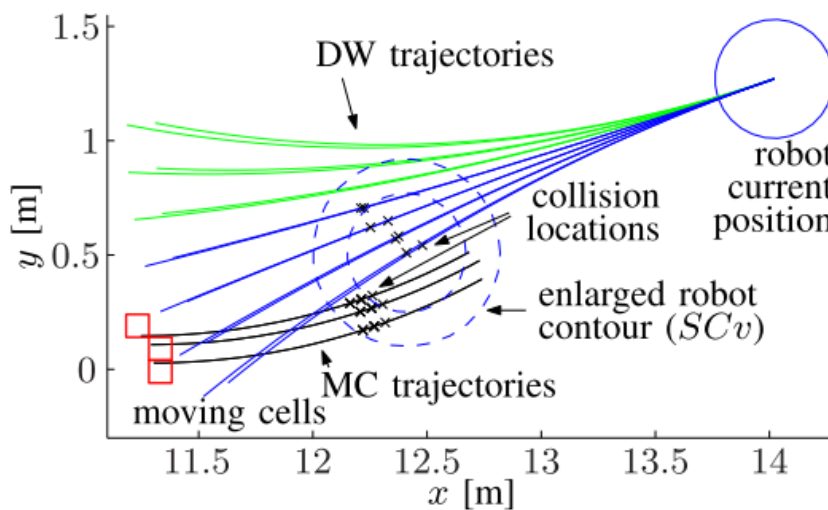
Figura 18 - Histograma de campo vetorial (VFH).



Fonte: Borenstein e Koren (1991)⁶⁰, modificada.

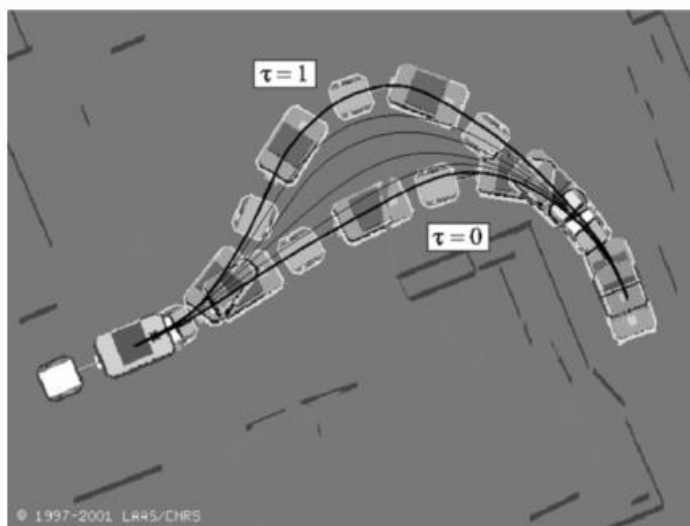
Por fim, será destacada a técnica de deformação de caminho²³, ilustrada na Figura 20, que consiste em modificar um caminho pré-planejado iterativamente, de forma a evitar obstáculos recém-identificados pelos sensores do robô. Esse tipo de técnica de desvio complementa um algoritmo de planejamento de caminho, e tem similaridades tanto com as técnicas de campos potenciais – pois o caminho é deformado iterativamente de acordo com um campo potencial – quanto com técnicas de janela dinâmica – uma vez que diversas alternativas para o novo caminho ou trajetória são exploradas de forma explícita.

Figura 19 - Janela dinâmica.



Fonte: Seder e Petrović (2007)⁶².

Figura 20 - Deformação de caminho



Fonte: Lamiriaux, Bonnafous e Lefebvre (2004)²³

2.5 Desvio de obstáculos em andadores inteligentes

2.5.1 Visão geral

A função de desvio de obstáculos é interessante em andadores inteligentes pois pode ajudar usuários com problemas visuais ou cognitivos, que teriam dificuldades em perceber ou reagir a obstáculos. O desvio de obstáculos foi uma das primeiras funções implementadas em andadores inteligentes, com o uso da técnica de seguimento de paredes³⁶ e histograma de campos vetoriais²⁶.

Existem distinções entre o desvio de obstáculos no contexto de andadores inteligentes e no contexto de um robô autônomo. Enquanto que um robô autônomo tem plena liberdade para modificar sua trajetória, um andador inteligente precisa garantir a

segurança de seu usuário – o que significa que movimentos bruscos, rápidos demais ou desconfortáveis devem ser evitados – e esse deve sentir que tem o andador sob seu controle¹². Além disso, certos andadores (com atuação passiva) não são sequer capazes de produzir movimento sozinhos, dependendo de forças produzidas pelas pernas do usuário. Por essas razões, a estratégia de desvio de obstáculos deve se integrar bem à maneira como o andador realiza as funções de suporte físico, auxílio de marcha e segurança contra quedas.

Algumas preocupações são muito mencionadas no contexto do desvio de obstáculos (e de navegação em geral) em andadores inteligentes. Uma dessas preocupações é garantir que o andador possa ser operado de forma intuitiva e natural^{12,15,16,20,63}, facilitando sua adoção e uso. Isso costuma inspirar interfaces em que o andador se comporta de forma similar, qualitativamente, a um andador tradicional. Andadores passivos apresentam naturalmente esse tipo de comportamento, uma vez que eles só conseguem se movimentar se impulsionados pelo usuário. No entanto, isso também é possível em andadores ativos ao tornar o andador responsivo a ações relacionadas à tentativa de mover o andador, como o empurrar para frente ou o movimento das pernas do usuário²⁰. Outra preocupação é garantir que o andador obedeça às intenções de movimento de seu usuário, de forma que esse se sinta no controle do andador^{64,65}. Para isso, é necessário que o andador seja capaz de identificar as intenções de seu usuário, o que pode ser feito de formas mais explícitas – como por botões que indicam o destino desejado¹⁴ ou por um *joystick*³⁶ – ou menos explícitas – como pela medição das forças de interação que o usuário aplica no andador.

Tais preocupações podem entrar em contradição com as estratégias de desvio de obstáculos pois, geralmente, tais estratégias fazem o andador se desviar sozinho e sem interferência do usuário. Existe o risco que isso seja interpretado como uma reação não natural contraditória aos comandos do usuário⁶⁶, e por isso deve-se ter cuidado ao projetar a estratégia de desvio. Por exemplo, o andador GUIDO¹⁴ contém tanto um modo de navegação automática – no qual o andador toma todas as decisões a respeito do caminho a ser tomado, enquanto que o usuário só controla a velocidade do andador e o destino final – quanto um modo manual, onde só estão ativas as funções de parada de segurança. Dessa forma, o usuário mantém sempre o controle da velocidade do andador, e é capaz de desativar o sistema de navegação autônoma caso ele o esteja limitando, mas isso é feito de forma deliberada e sem ambiguidades. Esse tipo de paradigma, no qual o controle é feito hora por um sistema autônomo e hora por um humano, pode ser denominado controle negociado (*traded control*)⁶⁷ e se opõe ao conceito de controle partilhado (*shared control*)⁶⁶, no qual o andador e seu usuário controlam a navegação de forma conjunta e simultânea. Um exemplo de técnica para o controle partilhado é a aplicação, por parte do andador, de pequenas forças de desvio com o objetivo de guiar o usuário de forma a desviar de um obstáculo.

2.5.2 Revisão da literatura

Nessa seção serão descritas algumas implementações de desvio de obstáculos em andadores inteligentes presentes na literatura.

O PAM-AID é um dos primeiros protótipos de andadores inteligentes, e é descrito por Lacey e Dawson-Howe (1997)³⁶ como um dispositivo robótico de auxílio à locomoção. Esse andador se baseia em um robô móvel (sendo, portanto, um andador ativo) no qual foram instalados suportes para apoio do usuário, e dispõe de sensores ultrassônicos e infravermelhos de distância, além de sensores de toque (*bumpers*). Esse andador possui dois modos de navegação, que podem ser selecionados pelo usuário: um manual, no qual o usuário controla o movimento do andador com um *joystick*, e um automático, onde é realizado o seguimento de paredes, retirando do usuário a decisão sobre o caminho a tomar. Em ambos os casos, um sistema de prevenção de colisão realiza paradas de emergência quando necessário.

O MARC Smart Walker, descrito por Wasson et al. (2001)¹⁵, é um andador passivo que contém freios (que podem ser atuados tanto pelo usuário quanto pelo sistema de controle) e uma roda frontal controlada por servomotor. Ele contém sonares e sensores infravermelhos como sensores de distância para a detecção de obstáculos e localização. O MARC Smart Walker foi testado com quatro estratégias de navegação distintas, sucessivamente mais complexas. A primeira estratégia é a de somente alerta (*warning system only*), na qual o andador utiliza atuadores vibratórios (preferíveis a alertas sonoros por serem mais discretos) nos pontos de apoio do usuário, para alertá-lo da presença de obstáculos. Na segunda estratégia, é acionado um sistema de frenagem de segurança, que aciona gradualmente os freios conforme a distância até obstáculos diminui. É importante ressaltar que essas duas estratégias não realizam o desvio de obstáculos – isso é responsabilidade do usuário após perceber uma vibração ou frenagem.

Na terceira estratégia de navegação do MARC Smart Walker, o andador monitora calcula uma direção desejada de navegação a partir do comportamento do usuário e posição dos obstáculos (o algoritmo que faz essa tarefa não é explicitado, mas provavelmente se trata do VFH ou dos campos potenciais, que são citados pelos autores em outro artigo⁶⁶), e tentar guiar o usuário para que ele assuma a direção calculada. Isso é feito reforçando movimentos que girem o andador na direção desejada e atenuando movimentos que girem o andador na direção oposta. No entanto, caso o usuário se mova na direção oposta à recomendada pelo algoritmo por muito tempo, o algoritmo de desvio é desativado temporariamente (mantendo, no entanto, as funções de frenagem de segurança) para evitar que o usuário sinta que está “lutando” contra o andador.

Por fim, a quarta estratégia do MARC Smart Walker utiliza um mapa do ambiente para que o andador determine um caminho de sua atual posição até o destino final. Caso o usuário se afaste consideravelmente desse caminho, inicialmente o andador tenta guiá-lo sutilmente de volta ao caminho, mas desiste caso o usuário insista em se afastar, de forma similar à terceira estratégia. Não é descrita a forma como essa estratégia lida com obstáculos que não se encontravam no mapa inicial.

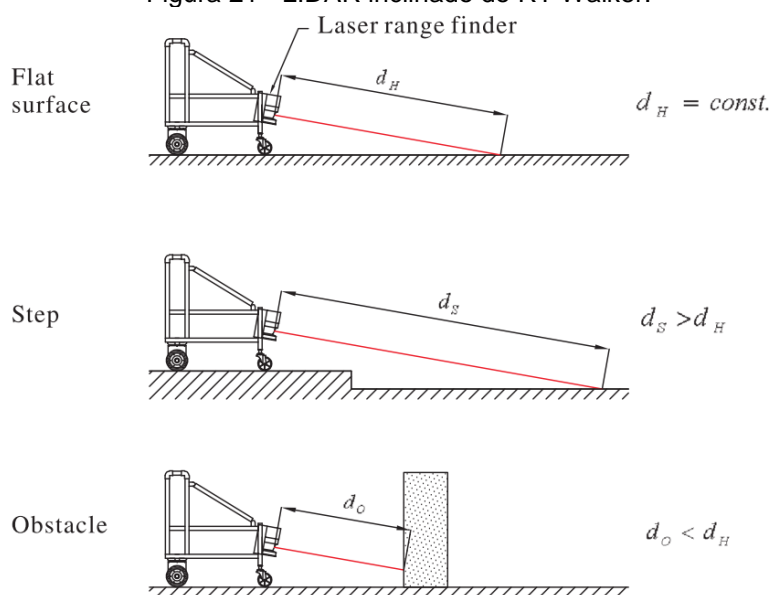
Apesar de apenas uma de suas estratégias (a terceira) de fato implementar o desvio de obstáculos, o MARC Smart Walker é bastante relevante para esta Dissertação porque todos os seus modos de navegação foram explicitamente projetados para que a interface com o usuário seja amigável. São inclusive descritos três princípios

de projeto para a interface entre usuário e o andador: o andador deve divergir lentamente dos comandos do usuário; não deve realizar curvas na direção oposta da apontada pelo usuário; e deve ser complacente (*compliant*), ou seja, comandos deliberados do usuário devem ser capazes de se sobrepor às sugestões de movimento do algoritmo de navegação, exceto em situações de risco (como parada de segurança). Deve-se ressaltar, no entanto, que esses princípios não são obedecidos rigorosamente por outros andadores inteligentes.

O andador inteligente GUIDO, em sua versão final descrita por Lacey e Rodriguez-Losada (2008)⁶⁸, é um andador passivo cuja rodas dianteiras tem sua direção controlada por servomotores. Esse andador possui sonares e um LIDAR como sensores de distância, que realizam a detecção de obstáculos e a localização em um mapa. O GUIDO possui dois modos de navegação, que podem ser selecionados pelo usuário: no modo manual, o andador se deixa levar pelo usuário, só realizando a função de prevenção de colisões via parada de emergência. No modo de navegação automática, um mapa do ambiente é utilizado para traçar uma rota (com uso do algoritmo A*⁶⁹) até o destino desejado. Esse modo automático se distingue do quarto modo de navegação do MARC Smart Walker em dois aspectos: no GUIDO, o sistema de controle do andador tenta se manter estritamente no caminho calculado, retirando assim a liberdade do usuário de se desviar do caminho (mas ele pode sair do caminho ao trocar para o modo manual). Além disso, esse modo realiza o desvio de obstáculos com a técnica de deformação de caminhos²³, recalculando rapidamente um novo caminho que evita obstáculos detectados.

O RT Walker⁷⁰ é um andador passivo que utiliza dois freios em suas rodas traseiras, e usa um LIDAR inclinado (ver a Figura 21) para detectar obstáculos e desníveis no chão que constituem obstáculos. Também são incorporados sensores de força nos apoios do usuário, que são usados para interpretar sua intenção de movimento. Esse andador constrói um mapa tridimensional do ambiente a partir das leituras do LIDAR, e o analisa para determinar quais regiões não podem ser percorridas pelo andador. Tais regiões são consideradas obstáculos na técnica de campos potenciais, que retorna um vetor de força. Essa força é usada como uma das entradas do sistema de controle cinemático do andador, sendo somada às forças aplicadas pelo usuário. O fato dessas forças serem somadas com as aplicadas pelo usuário permite que o usuário possa resistir a elas, bastando que ele aplique uma força oposta.

Figura 21 - LIDAR inclinado do RT Walker.



Fonte: [Hirata 2004]¹⁶

O sistema de controle do RT Walker, que pode ser denominado controle de admitância²⁰, tenta fazer com que a trajetória do andador seja a mesma de um objeto físico ideal, com massa, momento de inércia e coeficientes de atrito. Esse tipo de estratégia é uma forma natural de transformar entradas de força, sejam elas virtuais ou aplicadas pelo usuário, em saídas de velocidade do andador, que são usadas pelo sistema de controle das rodas. O controle de admitância responde de forma suave a forças aplicadas pois a dinâmica simulada possui inércia, o que é interessante no caso de andadores.

Finalmente, o FriWalk^{25,71} é um andador passivo com freios, que utiliza sensores RFID e câmeras para se localizar no ambiente e encontrar obstáculos. Esse andador implementa o desvio de obstáculos com a técnica de janela dinâmica, explorando de forma estocástica diversas trajetórias possíveis do andador. Tais trajetórias, no entanto, não são geradas indiscriminadamente: elas são geradas como se o andador estivesse sujeito a forças sociais, que tentam descrever a forma como pessoas negociam o espaço. Não é contemplado o caso de o usuário querer se desviar significativamente do caminho desejado.

3 Algoritmo proposto

3.1 Visão geral

O presente capítulo descreve um algoritmo – e duas versões preliminares – que tem por objetivo complementar a técnica de campos potenciais. O algoritmo proposto, denominado desvio de ponto crítico, lida somente com obstáculos móveis, produzindo uma força de desvio \vec{F}_{mov} que é função das posições e velocidades relativas do andador e dos obstáculos. Os obstáculos fixos são tratados normalmente pelo algoritmo de campos potenciais, produzindo uma força de desvio \vec{F}_{fix} . A força de desvio total \vec{F}_{desv} é a soma das duas forças calculadas:

$$\vec{F}_{desv} = \vec{F}_{mov} + \vec{F}_{fix} \quad (3.1)$$

A força de desvio calculada pode ser incorporada de várias formas pelo sistema de controle do robô móvel em questão. No contexto desta Dissertação, esse robô é um andador inteligente com sensores de força que soma as forças de desvio às forças aplicadas pelo usuário, usando o resultado como entrada para um sistema de controle de admitância.

Para a implementação do algoritmo proposto, pressupõe-se que obstáculos fixos e móveis foram adequadamente classificados e que as velocidades instantâneas dos obstáculos móveis e do robô são conhecidas. Os obstáculos móveis e o robô são modelados como círculos que colidem em caso de interseção. Os obstáculos fixos podem ser modelados de qualquer forma que possibilite a obtenção de um campo potencial – nuvem de pontos¹⁶, grade de ocupação⁵⁹, modelagem geométrica⁵⁸, etc.

3.2 Motivação do algoritmo

O objetivo de muitos andadores inteligentes é ajudar a locomoção de seu usuário no dia-a-dia e, para isso, esses andadores devem ser capazes de lidar com os ambientes frequentados por seu usuário. Uma grande parte desses ambientes, especialmente em um contexto urbano, consiste de locais pavimentados, parcialmente estruturados e partilhados com outras pessoas: hospitais, lojas, residências e ruas. Entretanto, essa última característica – a partilha do ambiente com outras pessoas – não é explicitamente considerada na estratégia de desvio de obstáculos usada pela maioria dos andadores na literatura^{14,16,41}, que utilizam técnicas que não distinguem entre obstáculos fixos e móveis. Assim, é interessante considerar se é possível melhorar a performance dessas técnicas de desvio de obstáculos caso essa distinção seja feita.

Ao avaliar as estratégias existentes, decidiu-se por tentar modificar a estratégia de desvio utilizada pelo andador RT Walker⁷⁰, que combina campos potenciais e o con-

trole de admitância. Isso porque a técnica apresenta características que foram consideradas bastante desejáveis:

Complacência (*compliance*) O usuário pode resistir às forças aplicadas pelo algoritmo de desvio, de modo que sua liberdade de movimento não é restringida.

Suavidade O uso do controle de admitância garante que o *setpoint* de velocidade do andador varie de forma contínua e funciona como filtro passa-baixa²⁰, o que pode evitar certo desconforto para o usuário.

Facilidade de interpretação Conjecturou-se que, por se tratar de um algoritmo simples, os campos potenciais permitem que o usuário do andador interprete mais facilmente o propósito das forças de desvio produzidas pelo andador no momento.

Resposta rápida A técnica de campos potenciais pode ser executada a partir de leituras de um LIDAR de forma rápida e em tempo linear, o que é interessante para sistemas de tempo real.

Extensibilidade Estratégias de controle que combinam a força do usuário a forças virtuais fornecem uma arquitetura de controle simples para a incorporação de novos comportamentos – como o desvio de obstáculos móveis. Isso porque caso se tenha um algoritmo que produz uma força virtual que induz o comportamento desejado, é trivial incorporá-lo ao somar essa força virtual às demais. Em contraste, não há uma forma tão simples de combinar caminhos ou trajetórias planejadas (uma solução para alguns casos é combinar as funções custo de cada um dos comportamentos).

Apesar dessas vantagens, é possível identificar problemas que podem surgir caso a estratégia do RT Walker seja usada em um ambiente com pessoas se movimentando. Alguns deles são:

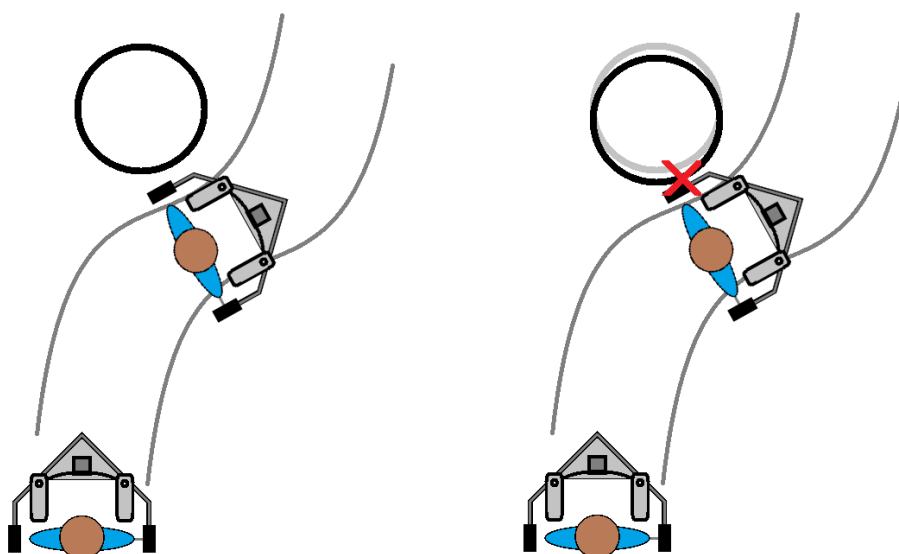
- Obstáculos móveis afetam o mapa construído pelo andador, o que pode levar o andador a acreditar que uma região está ocupada mesmo depois dela ter sido deixada;
- Obstáculos móveis que se movem em direção ao andador podem requerer que uma ação de desvio seja iniciada com maior antecedência (ver Figura 22). É difícil conciliar isso com a necessidade de limitar o alcance dos campos potenciais para que se obtenha uma navegação menos intrusiva (por exemplo, no RT Walker o maior alcance dos campos potenciais utilizado foi de 1,0m);
- A técnica de campos potenciais produz uma força de desvio que aponta na direção do gradiente do campo potencial, o que significa que a força produzida por um obstáculo à frente do andador será predominantemente para trás. Esse tipo de reação é mais condizente com uma ação de frenagem do que de desvio.

Para evitar tais problemas, decidiu-se que a técnica de campos potenciais não consideraria mais obstáculos identificados como móveis, que seriam tratados por um

algoritmo separado – o desvio de ponto crítico. Obstáculos fixos, no entanto, continuaram a se comportar da mesma forma, de forma que a navegação em um ambiente estático permanece inalterada.

Deve-se ressaltar que, para implementar a estratégia proposta, é necessário identificar os obstáculos móveis e obter suas velocidades, uma vez que esses são os parâmetros de entrada do algoritmo. Assim, neste Capítulo será assumido que tais valores são conhecidos, mas isso não é o bastante para uma implementação prática. No Capítulo 4, no qual implementações práticas são discutidas, essa questão será revisitada e será apresentada uma forma de realizar a identificação e *tracking* de obstáculos móveis.

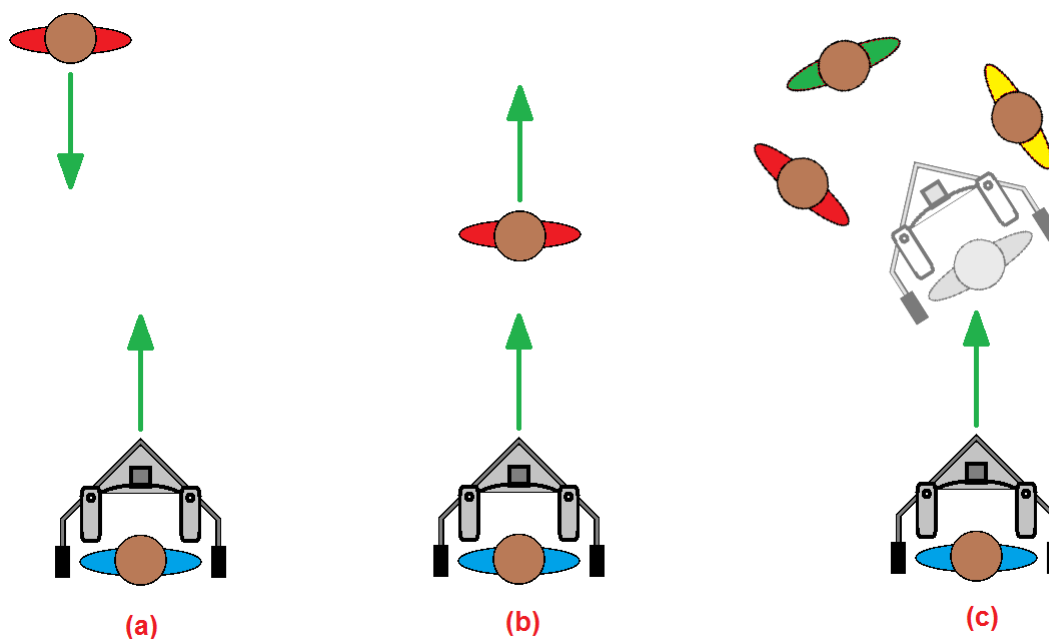
Figura 22 - Colisão devido ao movimento do obstáculo.



3.3 Situações problemáticas

Para explorar o comportamento de estratégias de desvio na presença de obstáculos móveis, foram identificadas situações em que tratar pessoas como obstáculos fixos pode gerar problemas. Essas situações são ilustradas na Figura 23 e serão descritas adiante.

Figura 23 - Situações problemáticas causadas por obstáculos móveis.



Na situação de **cruzamento em corredor** (letra (a) da Figura 23), o usuário do andador está em um corredor estreito, e surge uma pessoa percorrendo o corredor em sentido oposto. Nesse caso, é necessário que o espaço no corredor seja negociado, com ambas as pessoas se deslocando para mais perto da parede para evitar obstruir a via. Para isso, a estratégia de desvio deve ser capaz de lidar com a redução da distância até obstáculos, e é preferível que a ação de desvio ocorra com certa antecedência.

Na situação de **deslocamento em fila** (letra (b) da Figura 23) em corredor, o usuário do andador partilha o ambiente com pelo menos uma pessoa a sua frente, e ambos se encontram andando na mesma direção e com a mesma velocidade – uma situação bem plausível em um corredor. Nesse caso, não há risco de colisão enquanto a velocidade do usuário do andador não ultrapassar a da pessoa a sua frente. Entretanto, algoritmos que assumirem que o ambiente é estático irão constantemente assumir que uma colisão é iminente, e tomarão atitudes desnecessárias como frear ou tentar desviar da pessoa à frente.

Por fim, na situação de **interação social** (letra (c) da Figura 23) o usuário do andador se mantém próximo e de frente a uma pessoa (ou grupo de pessoas), para poder interagir socialmente mantendo contato visual. Nesse caso, é interessante que a estratégia de desvio não dificulte que o usuário se aproxime de outras pessoas, e não seja restritiva em excesso em relação à distância que deve ser mantida entre eles.

3.4 Tentativas preliminares

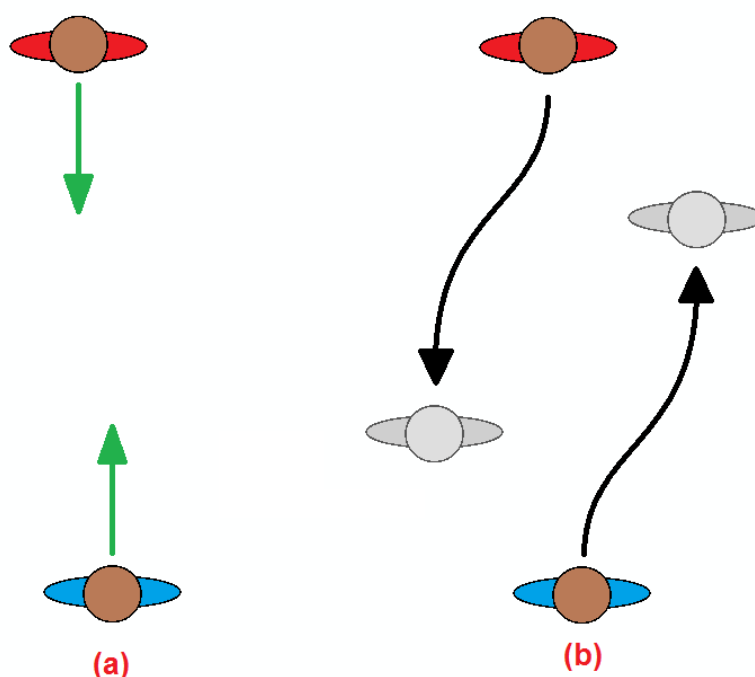
Esta seção descreve dois algoritmos desenvolvidos anteriormente ao desvio de ponto crítico, e que podem ser considerados versões preliminares do algoritmo final. Tais algoritmos são denominados “desvio de ponto de colisão” e “desvio de ponto próximo”. Será descrita a motivação por trás dessas versões preliminares e os problemas identificados nelas que motivaram suas modificações.

3.4.1 Desvio do ponto de colisão

O algoritmo de desvio do ponto de colisão produz uma força que tende a produzir o desvio de um obstáculo móvel. Esse algoritmo tenta emular a situação ilustrada na Figura 24, onde duas pessoas evitam uma colisão com um pequeno ajuste antecipado em suas trajetórias. Caso haja mais de um obstáculo móvel, o algoritmo é aplicado a cada um separadamente, e os vetores de força são somados.

Nesse algoritmo, caso se preveja que o andador e o obstáculo não colidirão no futuro próximo (em até t_{MAX}), nenhuma força é gerada. Caso uma colisão seja prevista, a direção da força de desvio é oposta à direção do ponto no qual se prevê que o andador e o obstáculo colidirão. Tal ponto é encontrado supondo que o andador e o obstáculo móvel tem formato circular, que eles se deslocam em um plano 2D, e que as velocidades lineares de ambos se manterão constantes. A intensidade dessa força depende do tempo até que a colisão ocorra, de forma que essa força é maior conforme o tempo até a colisão diminui, e é zero a partir do valor de tempo máximo (t_{MAX}).

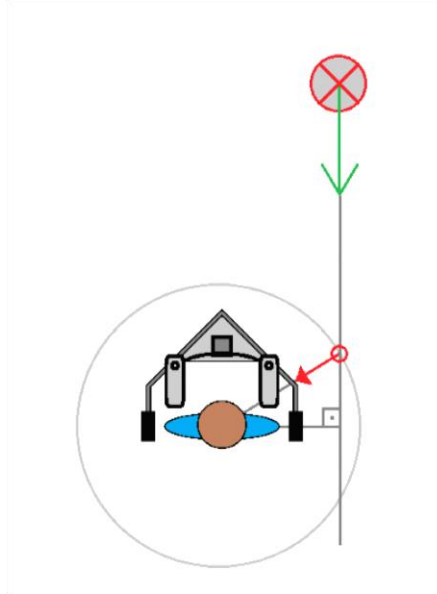
Figura 24 - Comportamento desejado para desvio obstáculos móveis desejado.



A Figura 25 ilustra o algoritmo de desvio do ponto de colisão. Esse algoritmo foi motivado principalmente pela situação de cruzamento em corredor, e nas condições

mostradas na figura fica claro que a força de desvio induz o andador a realizar um desvio com antecedência.

Figura 25 - Desvio do ponto de colisão.



Matematicamente, o algoritmo pode ser descrito como uma função que associa um vetor de força às velocidades e posições do andador e de um obstáculo. Representando, respectivamente, a velocidade do andador e do obstáculo por \vec{v}_a e \vec{v}_o , e as posições do andador e do obstáculo por \vec{r}_a e \vec{r}_o , a força de desvio \vec{F}_{mov} é função de todas essas variáveis:

$$\vec{F}_{mov} = f(\vec{v}_a, \vec{v}_o, \vec{r}_a, \vec{r}_o) \quad (3.2)$$

O algoritmo, no entanto, só considera velocidades e posições relativas entre o andador e o obstáculo. Assim, por conveniência, é possível reescrever a força como uma função de somente dois termos relativos de posição (\vec{r}) e velocidade (\vec{v}):

$$\vec{r} = \vec{r}_o - \vec{r}_a \quad (3.3)$$

$$\vec{v} = \vec{v}_o - \vec{v}_a \quad (3.4)$$

$$\vec{F}_{mov} = f(\vec{r}, \vec{v}) \quad (3.5)$$

Para calcular a intensidade e direção de \vec{F}_{mov} , primeiro é necessário encontrar o ponto de colisão (\vec{r}_{col}), caso ele exista. Para isso, é conveniente calcular o ponto de menor distância (\vec{r}_{min}) na trajetória do obstáculo ($\vec{r}(t)$) em relação ao andador, que ocorre no momento (t_{min}):

$$\vec{r}(t) = \vec{r} + t \cdot \vec{v} \quad (3.6)$$

$$\vec{r}_{min} = \min_t \vec{r}(t) = \vec{r} - \vec{v} \cdot \frac{\vec{r} \cdot \vec{v}}{|\vec{v}|^2} \quad (3.7)$$

Caso $|\overrightarrow{r_{min}}|$ seja menor que a soma dos raios do andador (R_a) e obstáculo (R_o) e t_{min} seja positivo, é possível concluir que a colisão ocorrerá no futuro, e assim basta encontrar o momento da colisão (t_{col}) com o uso da Equação (3.6):

$$|\overrightarrow{r(t_{col})}| = R_a + R_o \quad (3.8)$$

A Equação (3.8) tem duas raízes, equivalentes aos momentos em que os círculos do andador e do obstáculo se tocam e deixam de se tocar. Uma ação de desvio só deve ocorrer caso ambas as raízes sejam positivas, e deve-se considerar que t_{col} é a menor raiz. Um valor negativo e um positivo de t_{col} indicam que no momento atual ($t = 0$) os círculos já se encontram em contato, e dois valores negativos de t_{col} indicam que o obstáculo está se afastando do andador. Em ambos os casos, uma estratégia de desvio não é mais a resposta apropriada.

Após obter o valor de t_{col} , deve-se considerar se a colisão ocorrerá no futuro próximo, ou seja, se t_{col} é menor que t_{MAX} . Somente em caso afirmativo a força de desvio será diferente de zero. O módulo da força de desvio será de, no máximo, F_{MAX} , e decrescerá linearmente conforme o tempo até a colisão aumenta:

$$\vec{F}_{mov} = -\frac{\overrightarrow{r_{col}}}{|\overrightarrow{r_{col}}|} \cdot F_{MAX} \cdot \left(\frac{(t_{MAX} - t_{col})}{t_{MAX}}\right) \quad (3.9)$$

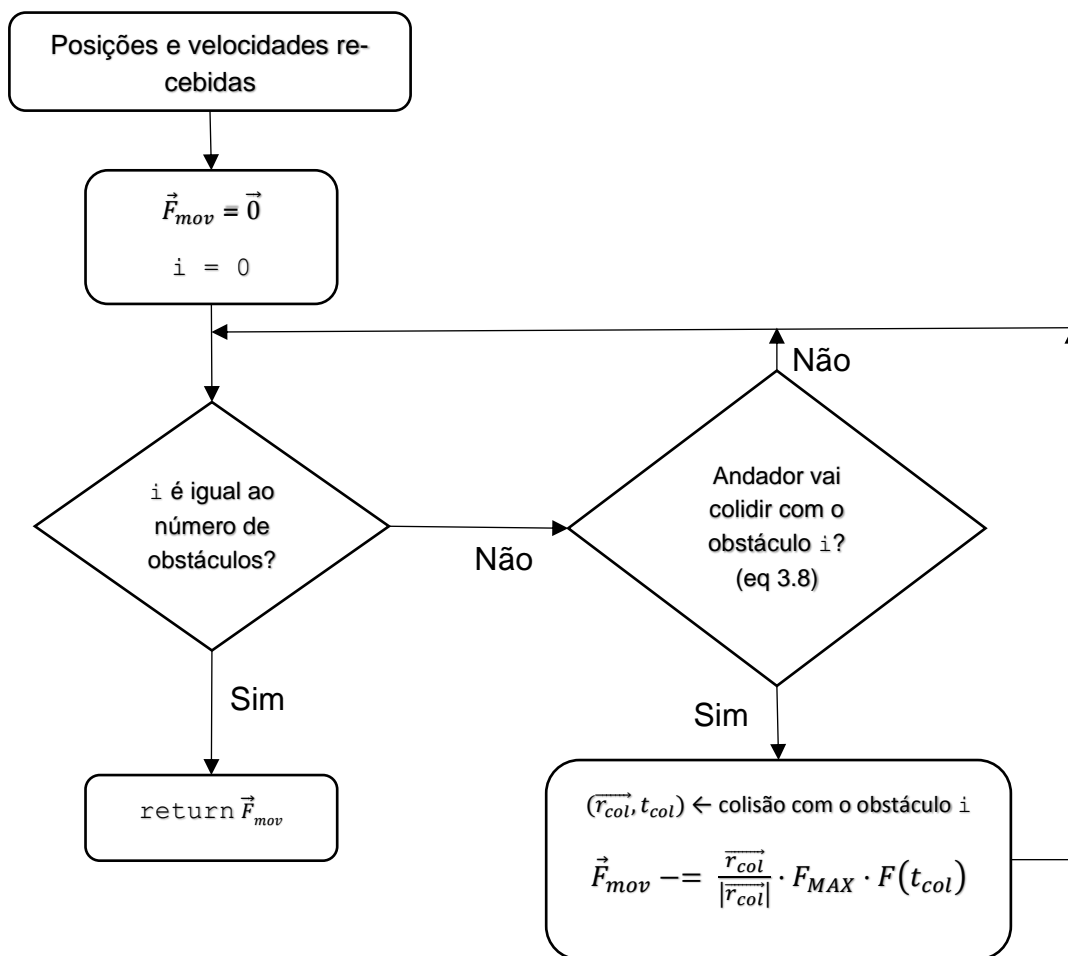
Deve-se ressaltar que não é necessário que a intensidade da força seja uma função linear do tempo de colisão. É trivial substituir o termo escalar na Equação (3.9) por uma função arbitrária do tempo de colisão $F(t_{col})$, que varia entre 0 e 1. O termo linear foi preferido por sua simplicidade:

$$\vec{F}_{mov} = -\frac{\overrightarrow{r_{col}}}{|\overrightarrow{r_{col}}|} \cdot F_{MAX} \cdot F(t_{col}) \quad (3.10)$$

$$F(t_{col}) = \begin{cases} \frac{t_{MAX} - t_{col}}{t_{MAX}}, & t_{MAX} > t_{col} \\ 0, & t_{MAX} \leq t_{col} \end{cases} \quad (3.11)$$

Um diagrama de fluxo ilustrando o algoritmo pode ser encontrado na Figura 26. As entradas do algoritmo são as velocidades e posições dos obstáculos móveis em relação ao andador, o que significa que o algoritmo pode ser executado sempre que novas leituras dos sensores de obstáculos ou de odometria forem obtidas, mantendo a força de desvio sempre atualizada.

Figura 26 - Diagrama de fluxo do desvio de ponto próximo



O algoritmo de desvio de ponto de colisão apresenta algumas vantagens caso comparado à técnica de campos potenciais. A principal é que ele permite que o andador inicie uma ação de desvio de um obstáculo distante caso se determine que uma colisão ocorrerá, enquanto que, no caso da técnica de campos potenciais, a força de desvio só surge quando o obstáculo se encontra dentro do raio de ação dos campos potenciais. Além disso, no caso da situação de cruzamento em corredor, a direção da força de desvio na técnica de campos potenciais costuma produzir uma força de frenagem, enquanto que na técnica de desvio de ponto de colisão ela é mais condutiva a uma ação de desvio. Isso fica bem claro na Figura 27, na qual são exibidos os vetores de força que obstáculos produziram em cada ponto ao redor do andador (com intensidade fora de escala). Outra vantagem é que é possível que o andador se aproxime de pessoas até que seus círculos de colisão se toquem, sem que isso produza forças de repulsão – algo impossível na técnica de campos potenciais, pois é necessário que os campos se estendam além dos raios de colisão.

Entretanto, testes práticos apontaram para um grande problema: enquanto que obstáculos que irão colidir com o andador podem produzir grandes forças, obstáculos que se aproximam muito do andador sem tocá-lo não produzem qualquer força, conforme ilustrado na Figura 28. Esse tipo de descontinuidade produz mudanças brus-

cas na força de desvio, o que pode resultar em um movimento brusco por parte do andador que produz uma experiência desconfortável para seu usuário.

Figura 27 - Comparação de forças produzidas por campos potenciais (a) e desvio de ponto de colisão (b) em pontos próximos ao andador. Considerou-se que o vetor da velocidade relativa entre o obstáculo e o andador aponta para baixo.

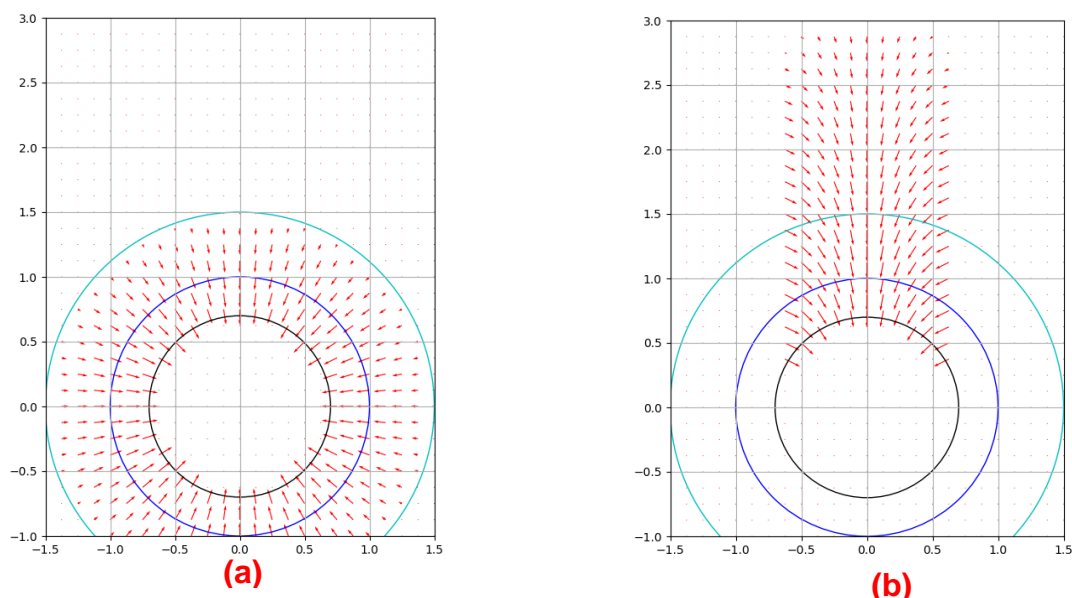
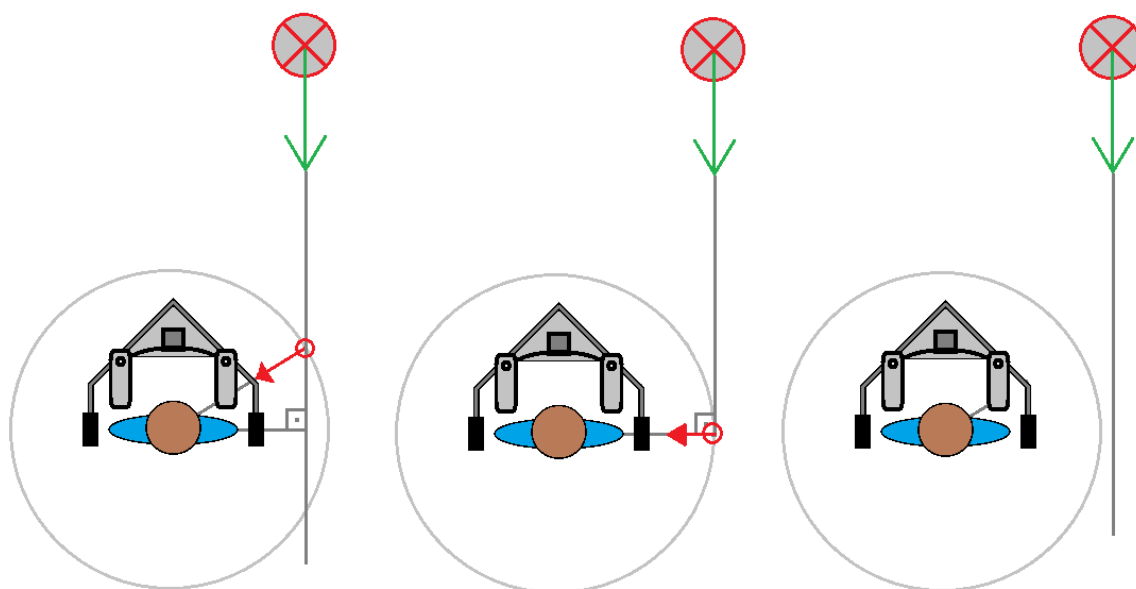


Figura 28 - Descontinuidade no desvio de ponto de colisão.



3.4.2 Desvio do ponto próximo

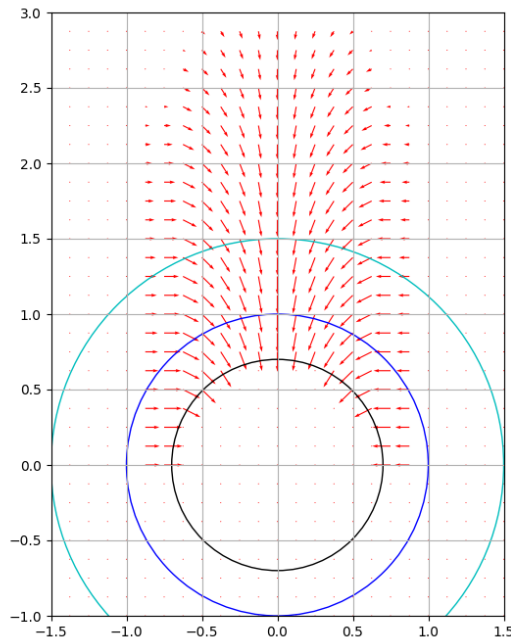
A estratégia de desvio do ponto crítico modifica a estratégia de desvio do ponto de colisão de modo que a função $\vec{F} = f(\vec{r}, \vec{v})$ se comporte de forma contínua, fazendo com que a força de desvio produzida por um obstáculo que acaba de sair da rota de colisão com o andador não caia a zero instantaneamente. Isso é feito estabelecendo

dois círculos em torno do andador, de raios R_{col} e R_{desv} , que são denominados, respectivamente, círculo de colisão e círculo de desvio.

O círculo de colisão tem dimensões iguais à distância mínima entre pontos centrais do andador e dos obstáculos para que colisões não ocorram – ou seja, $R_{col} = R_a + R_o$. Já o círculo R_{desv} é denominado círculo de desvio e tem dimensões um pouco maiores que o círculo de colisão, de acordo com uma distância desejada r_{desv} : $R_{desv} = R_{col} + r_{desv}$. A região entre os dois círculos é denominada zona de desvio, e obstáculos que a cruzam sem invadir o círculo de colisão também podem produzir forças de desvio.

A estratégia de desvio do ponto próximo se comporta exatamente como a estratégia de desvio de ponto de colisão para obstáculos que invadem o círculo de colisão. Obstáculos que invadem somente o círculo de desvio não são ignorados, mas a força de desvio que eles produzem é atenuada por um fator k , que se aproxima de zero conforme tais obstáculos invadem cada vez menos o círculo de desvio. O resultado, ilustrado na Figura 29, é um comportamento contínuo onde a força de desvio decai conforme obstáculos móveis deixam de colidir com o círculo de desvio.

Figura 29 - Desvio de ponto próximo.



O algoritmo proposto é denominado desvio do ponto próximo porque, no caso de obstáculos que invadem somente o círculo de desvio do andador, a força de desvio é calculada com o ponto na trajetória em que o obstáculo se encontra mais próximo do andador – o ponto \vec{r}_{min} calculado na Equação (3.7). Dessa forma, o usado para calcular a força de desvio pode ser tanto \vec{r}_{min} quanto \vec{r}_{col} , e é denominado \vec{r}_{desv} :

$$\overrightarrow{r_{desv}} = \begin{cases} \overrightarrow{r_{col}}, & \text{obstáculo invade } R_{col} \\ \overrightarrow{r_{min}}, & \text{obstáculo só invade } R_{desv} \end{cases} \quad (3.12)$$

A fórmula da força de desvio é similar à usada no desvio do ponto de colisão, mostrada na Equação (3.9), mas foi incluído o termo $k(\overrightarrow{r_{min}})$, responsável por reduzir continuamente a força a zero conforme $\overrightarrow{r_{min}}$ se aproxima de R_{desv} :

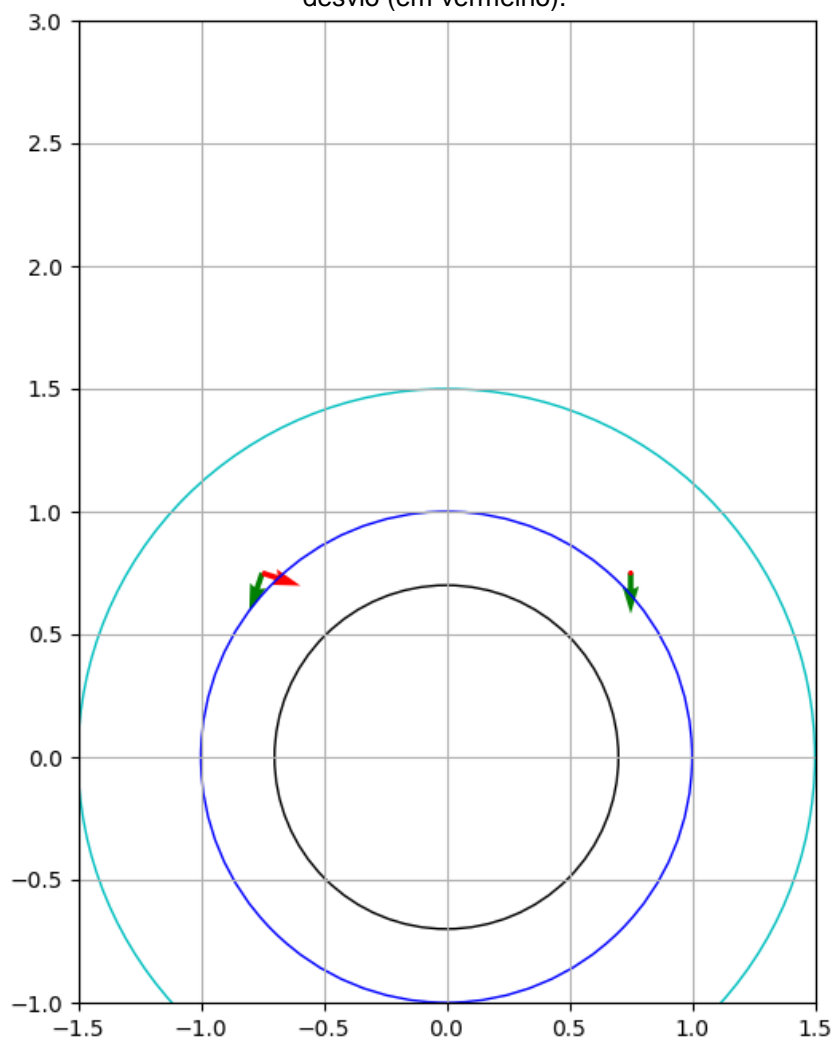
$$\vec{F}_{mov} = -\frac{\overrightarrow{r_{desv}}}{|\overrightarrow{r_{desv}}|} \cdot F_{MAX} \cdot F(t_{desv}) \cdot k(\overrightarrow{r_{desv}}) \quad (3.13)$$

$$k(\overrightarrow{r_{min}}) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{|\overrightarrow{r_{desv}}| - R_{col}}{R_{desv} - R_{col}} \right), & R_{col} < |\overrightarrow{r_{desv}}| < R_{desv} \\ 1, & |\overrightarrow{r_{desv}}| \leq R_{col} \end{cases} \quad (3.14)$$

Assim como a função que relaciona tempo de colisão e intensidade da força de desvio da Equação (3.10), a função k na Equação (3.14) não precisa ser linear, bastando que ela decresça de 1 até 0 conforme $|\overrightarrow{r_{min}}|$ vai de R_{col} até R_{desv} . Uma expressão linear foi usada por simplicidade.

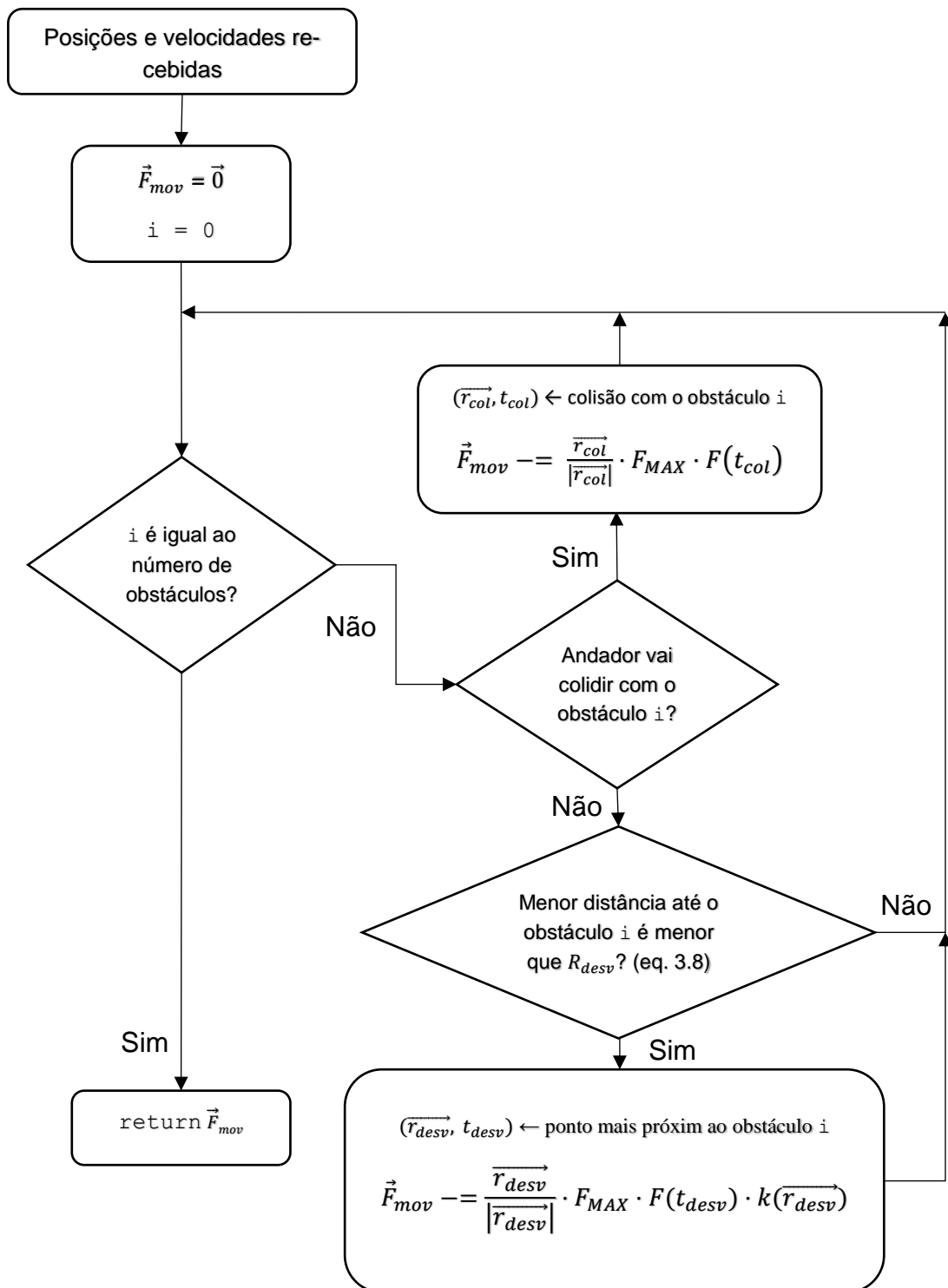
A estratégia do desvio do ponto próximo suaviza a estratégia de desvio de ponto de colisão sem comprometer o tempo de resposta, ao custo de não mais permitir uma distância tão curta entre os obstáculos móveis e o andador. Entretanto, uma análise matemática da função $\vec{F}(\vec{r}, \vec{v})$ revelou alguns comportamentos inesperados, resultado da multiplicação das funções $F(t_{desv})$ e $k(\overrightarrow{r_{min}})$: nem sempre se afastar ou se desviar de um obstáculo reduz a intensidade da força de desvio calculada. A Figura 30 ilustra um caso assim, onde são mostrados dois obstáculos em condições similares exceto pelo sentido do vetor velocidade, sendo que o obstáculo com vetor velocidade mais afastado do andador produz uma força de desvio maior (isso ocorre porque o ponto próximo se encontra mais perto da posição atual do obstáculo, resultando em um t_{desv} menor).

Figura 30 – Problemas no desvio de ponto próximo. Os obstáculos à esquerda e à direita se encontram à mesma distância do andador e as velocidades (vetores verdes) com mesmo módulo. No entanto, somente o obstáculo da esquerda, que aproxima menos do andador, produz uma força de desvio (em vermelho).



Um diagrama de fluxo do algoritmo de desvio de ponto próximo pode ser encontrado na Figura 31. A partir do diagrama, fica evidente que o comportamento dessa técnica é idêntico ao da técnica de desvio de ponto próximo para obstáculos que irão colidir com o andador.

Figura 31 - Diagrama de fluxo da técnica de desvio de ponto próximo.



3.5 Desvio de ponto crítico

A técnica de desvio de ponto crítico foi proposta para atender os problemas identificados na técnica de desvio de ponto próximo. Essa técnica atende um conjunto de características formais desejáveis para a função $\vec{F} = f(\vec{r}, \vec{v})$ quando ocorre a aproximação de um obstáculo:

- A aproximação do obstáculo do andador, mantidos constantes os demais parâmetros, nunca podem reduzir a força de desvio. Assim, $|\vec{F}(\vec{r}, \vec{v})| \geq |\vec{F}(k \cdot \vec{r}, \vec{v})|$ caso $0 \leq k \leq 1$. Esse requisito pode ser descrito pela heurística “obstáculos mais próximos são mais perigosos”;
- Um aumento da velocidade relativa entre andador e obstáculo, mantidos constantes os demais parâmetros, nunca pode reduzir a força de desvio. Assim, $|\vec{F}(\vec{r}, \vec{v})| \leq |\vec{F}(\vec{r}, k \cdot \vec{v})|$ para $k \geq 1$. Esse requisito pode ser descrito pela heurística “obstáculos que se aproximam mais rápido são mais perigosos”;
- Girar \vec{v} de modo a diminuir $\vec{v} \cdot \vec{r}$ (favorecendo assim uma colisão), mantidos os demais parâmetros, nunca pode reduzir a força de desvio. Assim, $|\vec{F}(\vec{r}, \vec{v}_1)| \geq |\vec{F}(\vec{r}, \vec{v}_2)|$ caso $|\vec{v}_1| = |\vec{v}_2|$ e $\vec{v}_1 \cdot \vec{r} \leq \vec{v}_2 \cdot \vec{r}$. Esse requisito pode ser descrito pela heurística “obstáculos que se aproximam mais diretamente são mais perigosos”.

Tais condições podem ser atendidas modificando a técnica de desvio de ponto próximo de forma a considerar toda a futura trajetória do obstáculo em relação ao andador, e não somente os pontos de colisão e de distância mínima. Nesse caso, o ponto considerado na fórmula de desvio será denominado ponto crítico (\vec{p}_{crit}), que é definido como o ponto da trajetória que maximiza o módulo da força de desvio na fórmula

$$\vec{F}_{mov} = -\frac{\vec{r}_{crit}}{|\vec{r}_{crit}|} \cdot F_{MAX} \cdot F(t_{crit}) \cdot k(\vec{r}_{crit}) \quad (3.15)$$

onde t_{crit} é o tempo até que a trajetória atinja o ponto crítico (ou seja, $\vec{r}_{crit} = \vec{r} + t_{crit} \cdot \vec{v}$). É possível reescrever essa equação de forma a isolar uma função $g(t_{crit}, \vec{r}_{crit})$ a ser maximizada:

$$\vec{F}_{mov} = -\frac{\vec{r}_{crit}}{|\vec{r}_{crit}|} \cdot F_{MAX} \cdot g(t_{crit}, \vec{r}_{crit}) \quad (3.16)$$

$$g(t_{crit}, \vec{r}_{crit}) = F(t_{crit}) \cdot k(\vec{r}_{crit}) = F(t_{crit}) \cdot k(\vec{r}(t_{crit})) \quad (3.17)$$

Assim, a técnica de desvio de ponto crítico pode ser descrita de forma algorítmica com os seguintes passos:

1. Determinar se o obstáculo está se afastando ou se aproximando do andador. Em caso de afastamento, considerar $t_{crit} = 0$ (o que só produz força se o obstáculo já estiver na zona de desvio do andador) e ir para o passo 6.

2. Determinar o ponto na trajetória do obstáculo em que ele estará à menor distância do andador, através da Equação (3.7). Dessa forma \vec{r}_{min} e t_{min} são encontrados.
3. Caso $|\vec{r}_{min}| \geq R_{desv}$, não há força de desvio pois o obstáculo nunca se aproxima o bastante do andador. Nesse caso é possível terminar o algoritmo.
4. Caso $t_{min} < t_{MAX}$, atribuir $t_{MAX} \leftarrow t_{min}$
5. Buscar o valor de t_{crit} que maximiza a Equação (3.17) no intervalo $[0, t_{MAX}]$. O valor de $r(t_{crit})$ é calculado pela Equação (3.6)
6. Calcular \vec{F} com base em t_{crit} .

A busca descrita no passo 5 do algoritmo não precisa ser realizada de forma numérica pois as funções F e k escolhidas permitem uma solução analítica, obtida ao igualar a derivada de $g(t_{crit}, \vec{r}_{crit})$ a zero. Assim, o ponto crítico é um dos pontos onde

$$\frac{\partial}{\partial t_{crit}} g(t_{crit}, \vec{r}(t_{crit})) = 0 \quad (3.18)$$

$$F(t_{crit}) \cdot \frac{\partial}{\partial t_{crit}} k(\vec{r}(t_{crit})) = k(\vec{r}(t_{crit})) \cdot \frac{\partial}{\partial t_{crit}} F(t_{crit}) \quad (3.19)$$

A Figura 32 e a

Figura 33 ilustram diferenças entre o algoritmo de desvio do ponto crítico e o de desvio de ponto próximo. A Figura 32 ilustra que a continuidade de $\vec{F}_{mov}(\vec{v}, \vec{r})$ não foi comprometida, enquanto que a Figura 33 ilustra a diferença entre os algoritmos de ponto próximo e ponto crítico. Por fim, a Figura 34 mostra ainda um diagrama de fluxo descrevendo o algoritmo da técnica de desvio de ponto crítico.

Figura 32 - Desvio de ponto próximo (a) e crítico (b).

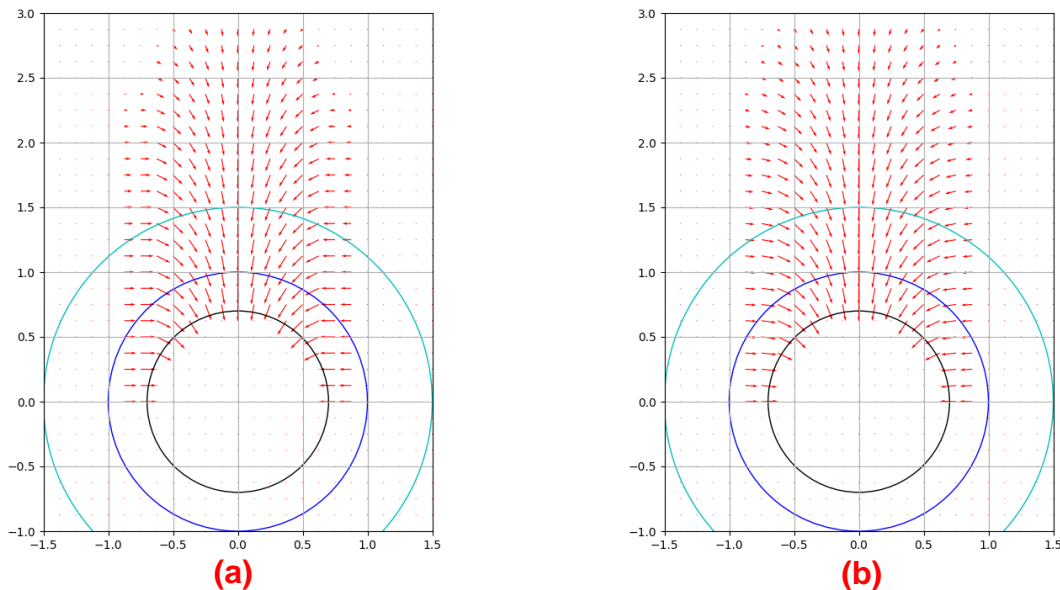


Figura 33 - Distinção entre o ponto próximo e o ponto crítico. A curva vermelha representa a intensidade da força de repulsão, que a técnica de ponto crítico tenta maximizar.

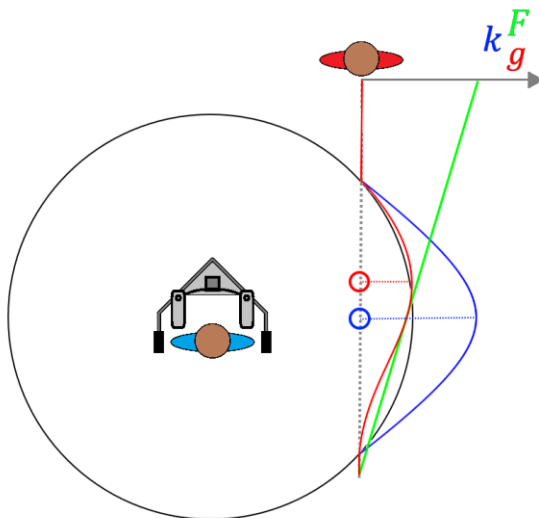
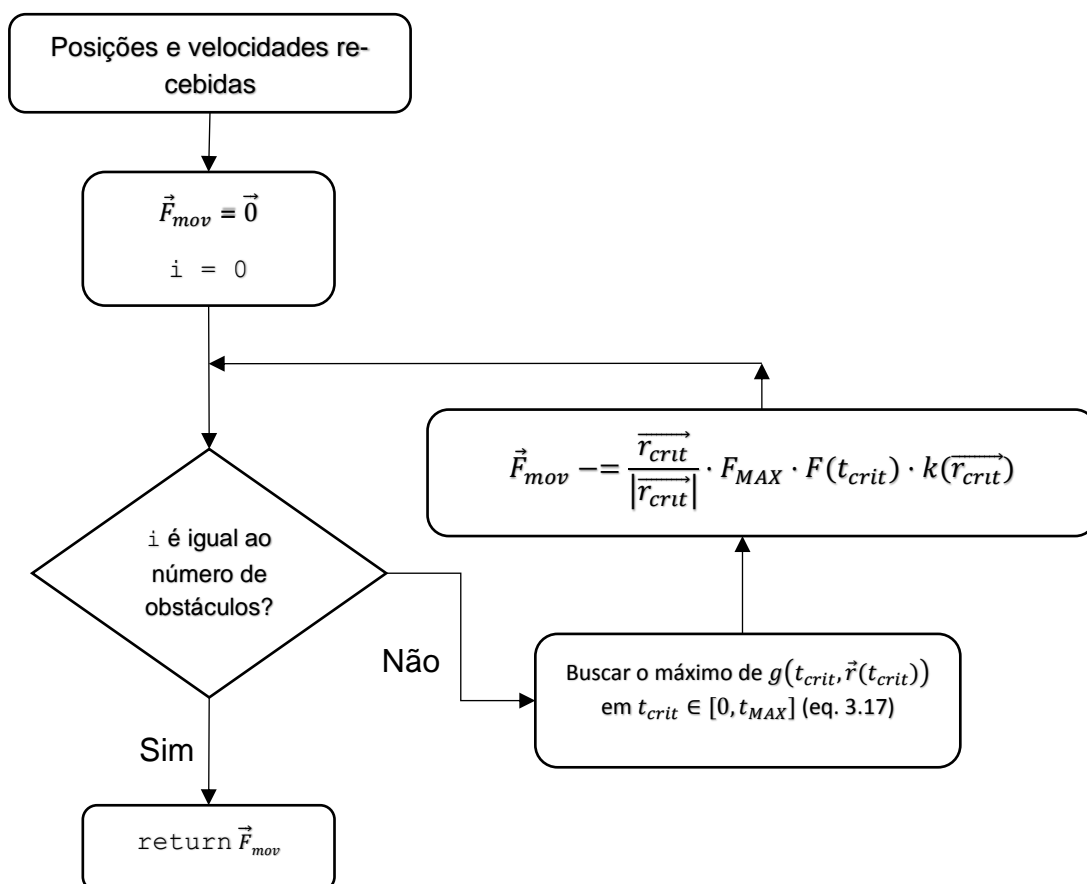


Figura 34 - Diagrama de fluxo do desvio de ponto crítico.



4 Materiais e Métodos

4.1 Implementação prática

As técnicas propostas no Capítulo 3 utilizam leituras de posição e velocidade de obstáculos móveis para produzir uma força virtual de desvio. Tais técnicas não são imediatamente aplicáveis em uma estratégia de controle de andador inteligente, uma vez que não há sensores que obtêm leituras de posição e velocidade de obstáculos móveis diretamente, e não há uso direto para as forças virtuais calculadas. Assim, são necessárias técnicas para converter os valores de força em algum tipo de comando de movimento, e para converter leituras de sensores em valores de posição e velocidade de obstáculos móveis.

Essa seção irá descrever a implementação de três técnicas que, quando utilizadas juntamente com as técnicas propostas no Capítulo 3, implementam uma estratégia de controle cinemático com interface humano-robô e desvio de obstáculos fixos e móveis. Tais técnicas são o controle de admitância (para converter forças virtuais em comandos cinemáticos), uma implementação dos campos potenciais através de LIDAR (para desvio de obstáculos fixos), e uma técnica de classificação e *tracking* de obstáculos móveis também com uso do LIDAR (para produzir as entradas das técnicas propostas no Capítulo 3).

4.1.1 Controle de admitância em robô uniciclo

A técnica de controle de admitância permite que um robô utilize seus atuadores para responder a forças aplicadas da mesma forma que um objeto idealizado com certos valores de massa e constantes de atrito. Isso é feito calculando as velocidades desse objeto e usando-as como *setpoint* para um controlador de baixo nível que aciona os atuadores²⁰. A técnica de controle de admitância pode ser pensada como complementar à técnica de controle de impedância, bastante utilizada por manipuladores robóticos, que produz uma saída de força (a ser aplicada pelos atuadores do robô) a partir das leituras de velocidade e posição⁷².

No contexto desta Dissertação, o controle de admitância foi aplicado em um andador com cinemática do tipo uniciclo, com duas rodas controladas por motores. Nesse caso, o movimento do robô envolve dois tipos de movimento: um movimento linear para frente, no qual ambas as rodas se movem para frente ou para trás na mesma velocidade, e um movimento angular, onde as rodas se movem com mesma velocidade em sentidos opostos, de modo que o robô gira em torno de um ponto no meio de suas rodas (esse ponto é denominado o eixo do robô).

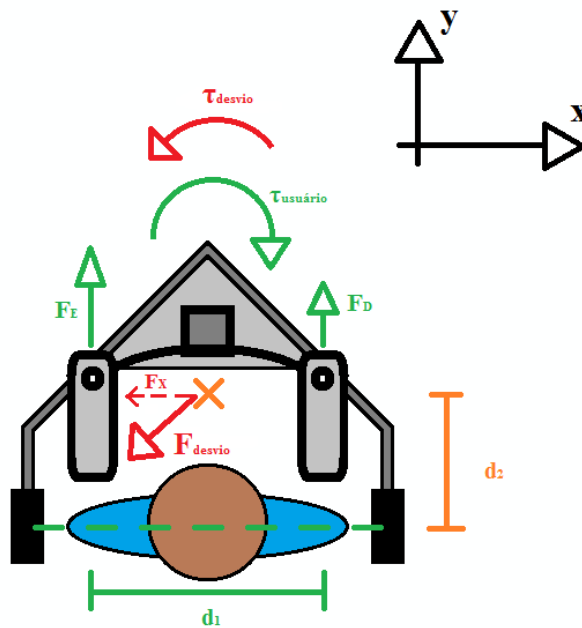
Uma caracterização cinemática do robô relaciona as velocidades angulares de suas rodas direita e esquerda (ω_r e ω_l), que têm raio r_w e estão afastadas de uma distância D , à velocidade angular (ω_z) e linear (v_x) do eixo do robô. O resultado são as seguintes equações (ver a Figura 35):

$$v_x = r_w \cdot \frac{\omega_r + \omega_l}{2} \quad (4.1)$$

$$\omega_z = r_w \cdot \frac{\omega_r - \omega_l}{D} \quad (4.2)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/r_w & D/2r_w \\ 1/r_w & -D/2r_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Figura 35 – Andador com rodas com cinemática de robô uniciclo.



Na implementação do controle de admitância, as velocidades ω_r e ω_l serão geradas a partir dos valores de v_x e ω_z , que são calculados quando se supõe que o robô se comporta como se ele tivesse a massa m , momento de inércia J , e estivesse sujeito a uma força linear para frente F_x e a um torque τ_z , além de estar sujeito a atritos lineares B e B_ω . Assim, tem-se as seguintes equações dinâmicas:

$$m \cdot \dot{v}_x = F_x - Bv_x \quad (4.4)$$

$$J \cdot \dot{\omega}_z = \tau_z - B_\omega \omega_z \quad (4.5)$$

É importante ressaltar que as equações (4.4) e (4.5) pressupõem uma força de atrito que cresce linearmente com a velocidade. Entretanto, verificou-se em testes práticos que esse comportamento parece pouco realista, pois espera-se que certo atrito estático impeça que o andador saia do repouso quando as forças aplicadas são pequenas. Assim, as expressões lineares envolvendo B e B_ω foram substituídas por fun-

ções F_{fricx} e τ_{fricz} , que implementam valores mínimos para as forças de atrito, produzindo uma força constante a baixas velocidades (atrito de Coulomb):

$$m \cdot \dot{v}_x = F_x - F_{fricx}(v_x, F_x) \quad (4.6)$$

$$J \cdot \dot{\omega}_z = \tau_z - \tau_{fricz}(\omega_z, \tau_z) \quad (4.7)$$

Os valores de F_x e τ_z são resultado da soma das forças virtuais de desvio e das forças aplicadas pelo usuário. As forças aplicadas pelo usuário no apoio direito e esquerdo são denominadas \vec{F}_r e \vec{F}_l , respectivamente. O valor de F_x pode ser calculado ao somar a componente no eixo x (que aponta para a frente do andador) de todas as forças envolvidas (\hat{x} é o vetor unitário que aponta para a frente do andador):

$$F_x = \hat{x} \cdot (\vec{F}_r + \vec{F}_l + \vec{F}_{desv}) \quad (4.8)$$

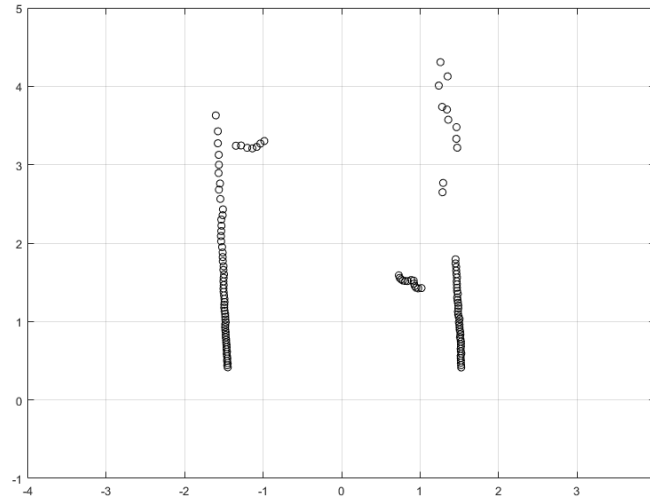
Os valores de τ_z , no entanto, só podem ser calculados determinando em que ponto as forças são aplicadas. Considerou-se que as forças \vec{F}_r e \vec{F}_l são aplicadas em pontos equidistantes do eixo de rotação do robô, afastados no eixo y pela distância d_h . Já a força de desvio é aplicada em um ponto à frente do eixo do andador, a uma distância de d_{ref} desse. Assim, tem-se a expressão (\hat{y} é um vetor unitário no eixo y, que aponta para a esquerda do andador):

$$\tau_z = \frac{d_h}{2} \cdot \hat{x} \cdot (\vec{F}_r - \vec{F}_l) + d_{ref} \cdot \hat{y} \cdot \vec{F}_{desv} \quad (4.9)$$

4.1.2 Campos potenciais a partir de LIDAR

A técnica de campos potenciais, nesta Dissertação, foi implementada a partir de leituras de um LIDAR. Esse sensor realiza leituras de distância em um plano horizontal, produzindo uma nuvem de pontos espaçados por um ângulo constante. Esse sensor foi montado à frente do andador, de modo que a visão de obstáculos atrás é obstruída. A Figura 36 mostra uma visualização das leituras do LIDAR do UFES Smart Walker.

Figura 36 - Conjunto de pontos resultante de uma leitura de um LIDAR em um corredor.



O valor do campo potencial é recalculado a cada nova leitura do LIDAR. Foi utilizada uma função quadrática para o cálculo do potencial (ver Equação (2.3)), escalada pela constante U_{MAX} . Assim, ao denominar P o conjunto de pontos dos obstáculos fixos, tem-se a seguinte expressão para o campo no ponto \vec{r} :

$$U(\vec{r}) = \begin{cases} U_{MAX} \cdot \left(d_{MAX} - \left(\min_{\vec{p} \in P} |\vec{p} - \vec{r}| \right) \right)^2, & \left(\min_{\vec{p} \in P} |\vec{p} - \vec{r}| \right) < d_{MAX} \\ 0 & \left(\min_{\vec{p} \in P} |\vec{p} - \vec{r}| \right) \geq d_{MAX} \end{cases} \quad (4.10)$$

Para o cálculo da força produzida pelo campo, no entanto, decidiu-se por realizar uma pequena modificação em relação à formulação original dos campos potenciais: em vez de se obter o gradiente do campo (ver Equação (2.1)), a força foi obtida por uma aproximação numérica desse gradiente, que é obtida calculando o potencial em pontos vizinhos, espaçados por uma distância Δ (que foi configurada em 10cm) do ponto original:

$$\vec{F}_{desv}(\vec{r}) = \left(\frac{U(\vec{r} + \Delta\hat{x}) - U(\vec{r} - \Delta\hat{x})}{2\Delta}, \frac{U(\vec{r} + \Delta\hat{y}) - U(\vec{r} - \Delta\hat{y})}{2\Delta} \right) \quad (4.11)$$

A razão para o uso de uma aproximação do gradiente é que verificou-se que nem sempre a função $U(\vec{r})$ possui um gradiente, e esse gradiente pode variar de forma descontínua. A implementação numérica em (4.11) é contínua e resolve esses problemas.

4.1.3 Classificação e *tracking* de obstáculos

Foi necessário um algoritmo capaz de interpretar as leituras do LIDAR e separar obstáculos fixos e móveis. O resultado desse algoritmo deve ser uma nuvem de pontos, que pertencem todos a obstáculos fixos, e uma lista de obstáculos móveis, com velocidade, posição e dimensões.

A separação foi feita ao agrupar a nuvem de pontos em objetos com o algoritmo DBSCAN (*Density-based Scan*)⁷³, que agrupa pontos por um critério simples de distância. Em seguida, tais objetos são filtrados em relação a suas dimensões: objetos muito extensos – que não podem ser contidos em um círculo de raio 1m em torno de seu centro de massa – são considerados objetos fixos, e os objetos restantes podem ser considerados objetos móveis ou fixos, dependendo de se ter observado ou não algum deslocamento desses objetos entre leituras.

Para determinar se um objeto é o mesmo que um detectado em uma leitura anterior, a posição anterior do objeto é projetada na nova leitura (o que envolve corrigir mudanças causadas pelo movimento do andador) e a distância entre os objetos é avaliada. Caso o objeto seja móvel, sua velocidade é, então, estimada a partir do seu deslocamento entre as leituras.

4.2 UFES Smart Walker

4.2.1 Descrição

O UFES Smart Walker, ilustrado na Figura 37, é o protótipo de andador inteligente usado para testes nesta Dissertação. Esse andador conta com rodas motorizadas e um conjunto de sensores que serão descritos a seguir. Alguns exemplos de trabalhos desenvolvidos no UFES Smart Walker são [Elias 2012]⁷⁴, [Tausel 2014]⁴⁴, [Valadão 2014]¹⁹ e [Cifuentes 2014]⁷⁵.

Figura 37 - UFES Smart Walker.



Fonte: Mello (2018)⁴⁶.

A base do UFES Smart Walker é a de um andador com três rodas, possuindo duas rodas traseiras de orientação fixa, que são acionadas por motores CC reversíveis, e uma roda dianteira livre (roda castor) que, idealmente, serve apenas como ponto de equilíbrio. Assim, esse andador pode ser descrito como um robô uniciclo. Os motores utilizados nas rodas possuem grande redução e considerável atrito estático, de forma que o usuário não consegue mover as rodas quando os motores se encontram desenergizados.

O andador possui um sistema de odometria baseado em encoders instalados nas rodas e em uma unidade de medição inercial (IMU), que contém um acelerômetro, magnetômetro e giroscópio, e é usada principalmente para mitigar o acúmulo de erros na estimativa da orientação absoluta do andador que surge com a integração das leituras dos encoders.

Para medir o estado e as intenções do usuário, são usados sensores de força e LIDAR. Há dois sensores de força, um em cada apoio de antebraço, realizando medidas das forças de interação entre usuário e andador. Tais sensores são células de carga modelo MTA400 (Futek, EUA), e realizam medidas de força em três eixos. A 40cm do chão e apontando para o usuário há um LIDAR Hokuyo URG-04LX, usado para obter a distância às pernas do usuário do andador. As leituras desse sensor não foram utilizadas pelas estratégias implementadas nesta Dissertação.

Para a detecção de obstáculos é utilizado um LIDAR RoboPeak RP-LIDAR, posicionado à frente do andador a uma altura de 50cm do chão, que realiza leituras em um plano horizontal a 5Hz, com uma resolução angular de aproximadamente 1 grau e alcance de cerca de 6m.

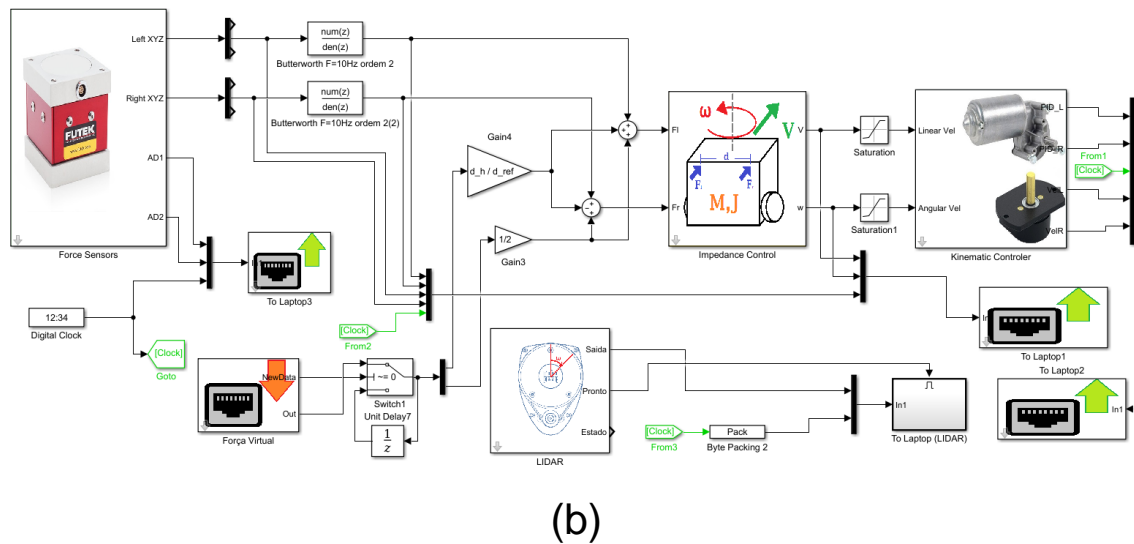
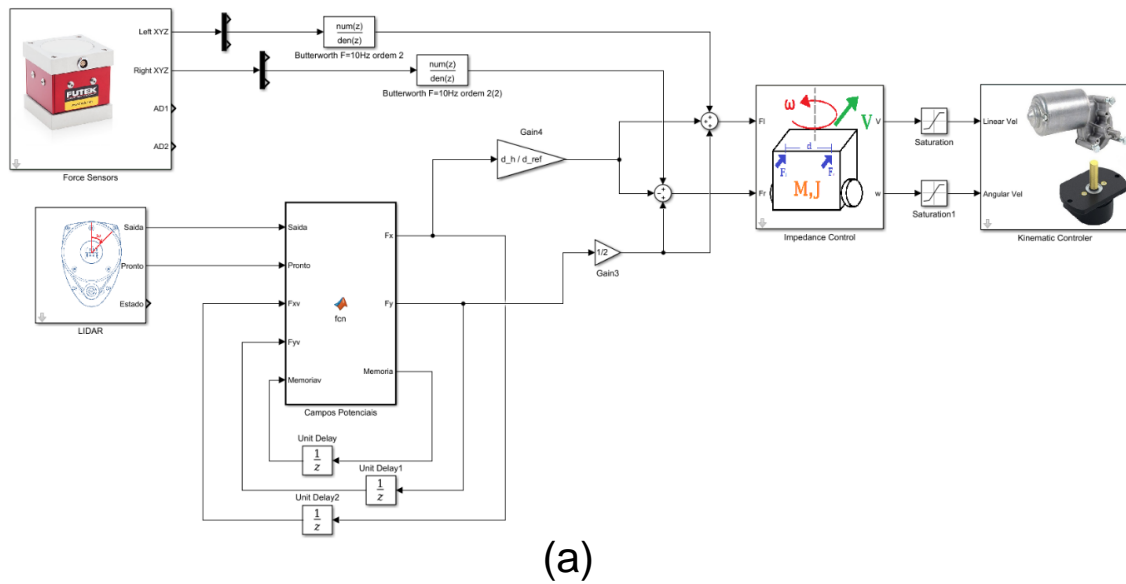
Para a implementação dos algoritmos de controle do andador, existe a bordo um computador embarcado da família PC/104, que contém um processador x86 Atom N450, de 1,67GHz, e 2GB de RAM. Nesse computador é executado o sistema operacional Simulink Real-Time, responsável por executar um loop de controle que é programado no ambiente Simulink. Esse ambiente de programação foi escolhido por permitir uma prototipagem rápida com o uso de programação em blocos, mas é importante notar que, em versões futuras do UFES Smart Walker, há planos de substituí-lo em favor de um computador embarcado com sistema operacional Linux, no qual a estratégia de controle é implementada no ROS (*Robot Operating System*), que será descrito em mais detalhes a seguir.

4.2.2 Implementação da estratégia

As estratégias de navegação do andador foram implementadas, no UFES Smart Walker, usando o Simulink Real-Time. Nesse software elabora-se um diagrama de blocos que descreve o loop de controle. Para isso, foram implementados blocos que realizam a aquisição dos dados dos sensores (de força, LIDAR e de odometria), que implementam o controle de admitância, que implementam estratégias de desvio (campos potenciais, desvio de ponto de colisão e desvio de ponto próximo), e que implementam o controle das velocidades das rodas do andador com um controlador PID. No item (a) da Figura 38 é demonstrado o diagrama de blocos que implementa o desvio de obstáculos por campos potenciais.

A implementação dos algoritmos de desvio de ponto de colisão e desvio de ponto próximo, no entanto, não foi feita no hardware embarcado no andador. Em vez disso, esses algoritmos foram executados em um laptop apoiado no andador, que se comunica com o andador por uma conexão de rede Ethernet. Esse laptop, que também é responsável pela aquisição de dados, recebe as leituras de todos os sensores do andador, realiza a separação de obstáculos fixos e móveis, e implementa a técnica de desvio desejada. A saída da técnica de desvio é uma força virtual que é enviada pela rede de volta ao andador. Nesse caso, o diagrama de blocos que descreve o controle do andador faz o uso de blocos que enviam e recebem dados pela rede, conforme mostrado no item (b) da Figura 38.

Figura 38 - Blocos no Simulink.



4.3 Simulação em ambiente virtual

4.3.1 ROS – Robot Operating System

4.3.1.1 Descrição

O ROS⁷⁶ é uma plataforma de software em código aberto para robótica, que tem por objetivo facilitar o desenvolvimento e implementação de estratégias de controle de robôs. Para isso, o ROS fornece uma série de bibliotecas e ferramentas, além de definir uma interface para a comunicação entre processos que visa facilitar o reuso de software. O ROS é descrito por seus desenvolvedores como um “meta-sistema operacional”, por fornecer recursos como abstração de hardware e comunicação entre processos, e é executado como uma aplicação sobre um sistema operacional convencional (geralmente uma máquina Linux, ou um conjunto de máquinas Linux em rede).

O software desenvolvido na plataforma ROS é organizado em torno dos conceitos de nós, tópicos e serviços. Os nós, que são implementados por processos no sistema operacional hospedeiro, são elementos que realizam operações computacionais e se comunicam com outros nós. A comunicação entre nós é padronizada pelo ROS sob a forma de tópicos e serviços, que são registrados em um espaço de nomes comum a todos os nós. A distinção entre esses dois elementos é que a comunicação por tópicos envolve a publicação de dados por parte de um elemento publicador (*publisher*) de forma indiscriminada a todos os elementos assinantes (*subscriber*) do tópico em questão (comunicação *one-to-many*), enquanto que comunicação por serviços envolve um provedor de serviço (*service proxy* ou *service server*) respondendo a requisições. É possível visualizar uma aplicação ROS com um grafo no qual os nós são vértices, que são interligados por tópicos e serviços.

O ROS permite o remapeamento dos nomes de nós, tópicos e serviços em tempo de execução (durante a inicialização dos nós), de forma que frequentemente é fácil reutilizar código ao simplesmente renomear as interfaces (tópicos e serviços) que um nó acessa. Para facilitar esse tipo de reuso, é recomendável que uma aplicação desenvolvida no ROS seja granular, ou seja, que funções conceitualmente distintas sejam separadas em diferentes nós sempre que possível. Assim, em uma aplicação típica, costumam haver um conjunto de nós dedicados a adquirir dados dos diferentes sensores e publicá-los em tópicos; um conjunto de nós dedicados a ler e processar, em diversas etapas, os tópicos com os dados dos sensores e calcular a resposta apropriada do robô; e um conjunto de nós responsável por ler os tópicos com as respostas apropriadas e enviá-las aos atuadores do robô.

Uma grande vantagem da granularidade oferecida pelo ROS é possível transformar uma implementação ROS que controla um robô simulado em uma implementação que controla um robô real (e vice-versa) com poucas alterações: em princípio só é necessário substituir os nós de leitura dos sensores e controle dos atuadores por nós que se comunicam com um simulador.

4.3.1.2 Implementação do algoritmo proposto

A implementação do controle do andador, no ROS, foi feita separando as seguintes funcionalidades em nós distintos: controle de admitância, controle das rodas (PID) e algoritmo de desvio. Esses nós serão descritos a seguir.

O nó de controle de admitância implementado, denominado `adm_ctl`, realiza a leitura do tópico `total_wrench`, que deve conter a soma das forças e torques produzidos pelo usuário e pelo algoritmo de desvio (F_x e τ_z), e publica as velocidades angulares e lineares resultantes (v_x e ω_z) no tópico `walker_setpoint`. Tais velocidades são convertidas para as velocidades das rodas (ω_r e ω_l) por um outro nó, denominado `t2w`, que publica os tópicos `lwheel_setpoint` e `rwheel_setpoint`. O nó `adm_ctl` implementa o controle de admitância ao resolver de forma analítica as equações diferenciais (4.6) e (4.7). Esse nó tem como parâmetros os valores dinâmicos m , J , B e B_ω , além dos parâmetros de atrito mínimo $F_{\text{drag_min}}$ e $T_{\text{drag_min}}$ com os valores do atrito de Coulomb a baixas velocidades.

O algoritmo de controle das rodas é um PID simples, implementado em dois nós, um para cada roda (`lwheel_pid` e `rwheel_pid`). Esses nós leem os tópicos de *setpoint* (`lwheel_setpoint` e `rwheel_setpoint`) e de odometria das rodas (`lwheel_odom` e `rwheel_odom`), e publicam nos tópicos de saída dos motores das rodas (`lwheel_ctl` e `rwheel_ctl`). Os tópicos com a odometria das rodas e com a saída dos motores estão diretamente ligados aos sensores e atuadores do andador, e por isso devem ser escritos e lidos, respectivamente, por nós que recebem leituras dos sensores e que enviam valores de atuação para os motores. Os nós do PID utilizados são os nativos do ROS, e podem ter seus parâmetros de controle modificados livremente (constantes K_p , K_d e K_i , frequência de corte, limites superiores e inferiores, etc).

O algoritmo de desvio foi implementado todo em um nó único, denominado `social_nav`. Esse nó recebe a nuvem de pontos de leituras do LIDAR (tópico `laser`) e as informações de odometria do andador, e produz a força de desvio, que é publicada nos tópicos `force_x` e `force_y`. Os dados da odometria do andador são recebidos através do tópico `tf`, que reúne transformações entre sistemas de coordenadas. O tópico `social_nav` tem como parâmetro o tipo de algoritmo de desvio utilizado, que pode ser campos potenciais, ou uma combinação dos campos potenciais com os algoritmos propostos no capítulo 3.

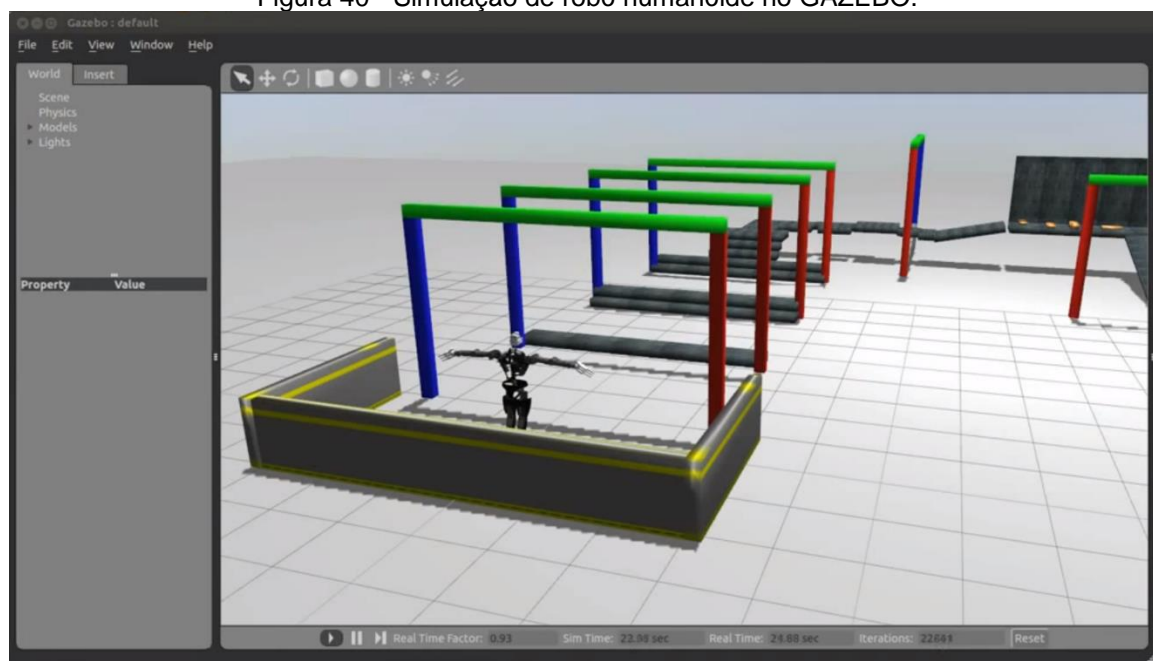
A Figura 39 contém um diagrama, gerado pela ferramenta `rqt_graph`, que ilustra os nós e tópicos implementados, e suas relações.

4.3.2 GAZEBO

4.3.2.1 Descrição

O GAZEBO⁷⁷ é um software para realização de simulações físicas, com foco em robótica. A Figura 40 ilustra a realização de uma simulação com um robô humanoide no GAZEBO. Esse software realiza simulações de dinâmica de corpos rígidos, ou seja, ele modela objetos como um conjunto de elos (*links*) que possuem parâmetros inerciais (massa e momentos de inércia), e que podem se tocar ou colidir. Tais inte-

Figura 40 - Simulação de robô humanóide no GAZEBO.



Além de simular colisões e juntas, o GAZEBO tem recursos para a aplicação de forças e torques arbitrários, o que permite a simulação de atuadores mecânicos, e para a simulação de sensores como câmeras e LIDARs, que produzem saídas de acordo com o estado da simulação. O GAZEBO fornece APIs para acessar tais funcionalidades, e assim é possível implementar, em uma aplicação externa, uma estratégia de controle para o robô simulado a partir da leitura contínua dos sensores e produção de forças e torques nos pontos onde se encontram os atuadores.

No GAZEBO, a simulação física é realizada de forma independente da renderização em 3D dos objetos. A renderização é feita pelo motor gráfico Ogre3D, enquanto que a simulação física é realizada por um motor físico que é escolhido durante a compilação do GAZEBO (são suportadas as opções ODE, Bullet, Simbody e DART). Essa separação faz com que seja necessário especificar separadamente a aparência de um objeto no GAZEBO e seus elementos de colisão. Uma vez que a simulação física pode ser computacionalmente custosa, é comum que os elementos de colisão dos robôs sejam formas mais simplificadas que seus modelos visuais.

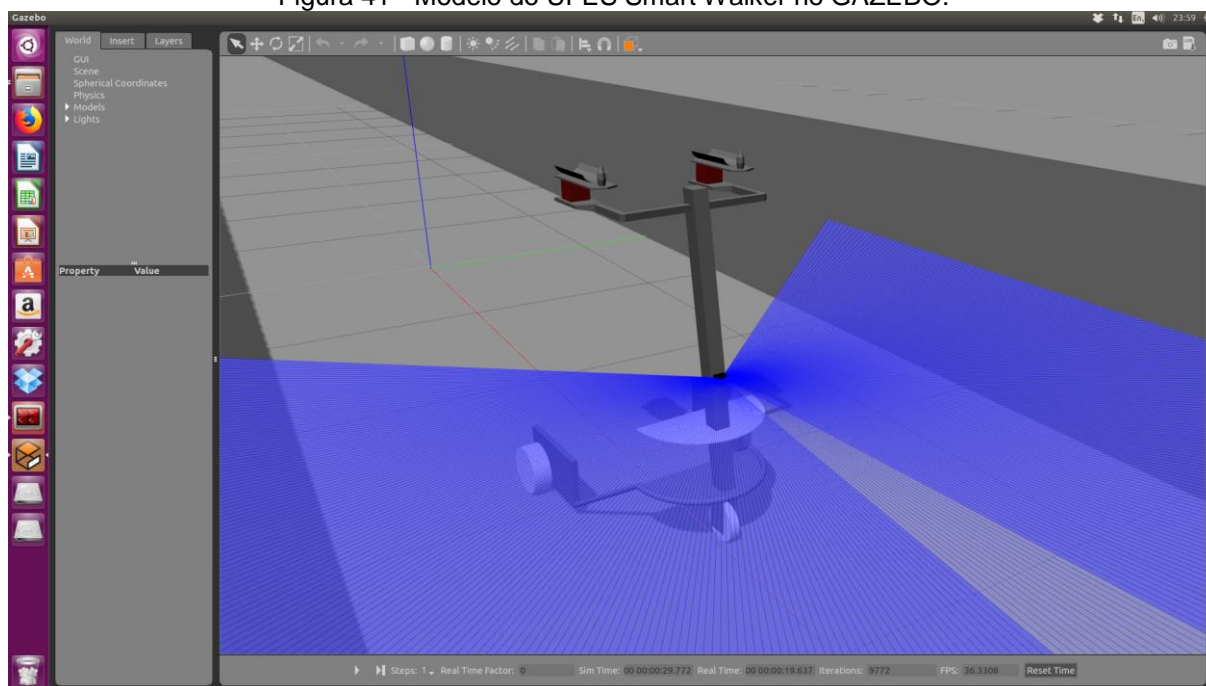
4.3.2.2 Modelo virtual do UFES Smart Walker

Para a realização de simulações, foi gerado um modelo simplificado do UFES Smart Walker, mostrado na Figura 41. Nesse modelo, as rodas traseiras do andador são cilindros acoplados à base do andador por eixos (modelados por uma junta do tipo *revolute*), nos quais são produzidos torques para simular o acionamento de um motor CC. Tais rodas tiveram seus parâmetros de superfície configurados de forma a simular um material aderente. A roda castor dianteira teve seu elemento de colisão simulado por uma esfera acoplada rigidamente à base do andador, com uma superfície sem atrito, de forma a servir apenas como ponto de apoio para impedir que o andador caia para frente. A Tabela 1 contém uma lista com parâmetros físicos do andador simulado, que foram escolhidos para que fossem valores plausíveis de um andador real.

Base do Andador		
Massa	10	kg
Momento de Inércia		
Eixo x	0.42	kg·m²
Eixo y	0.42	
Eixo z	0.32	
Rodas		
Raio	8	cm
Largura	6	cm
Distância entre rodas	72	cm
Massa	1,00	kg
Momento de Inércia	.0019	kg·m²
Eixo de rotação	.0019	
Eixos radiais	.0032	
Coeficiente de atrito de Coulomb	1,00	N / N (adimensional)
Motores e eixos		
Torque Máximo	±100	N·m
Atrito no eixo	0.03	N·m / (rad/s)

Tabela 1- Parâmetros físicos do andador simulado

Figura 41 - Modelo do UFES Smart Walker no GAZEBO.



4.3.2.3 Integração com o ROS

Para que o ROS fosse usado para controlar um robô simulado no GAZEBO, foi utilizada a biblioteca `gazebo_ros`, que disponibiliza acesso à simulação do GAZEBO sob a forma de nós, serviços e tópicos do ROS. O `gazebo_ros` é implementado como uma *thread* do GAZEBO que interage com o ROS como um nó comum, publicando uma grande quantidade de tópicos e fornecendo uma grande variedade de

serviços relativos à simulação. Um desses tópicos é o `clock`, que sincroniza o tempo do ROS de acordo com o tempo atual da simulação.

Para atuação e leitura da odometria das rodas, foram criados nós que interagem com o `gazebo_ros` como se ele fosse uma interface com o hardware de um andador real. O nó de acionamento dos motores, denominado `motor_write`, envia comandos de aplicação de torque nos eixos das rodas a partir de chamadas periódicas ao serviço `apply_joint_effort`. De forma complementar, a aquisição dos dados de odometria é feita pelo nó `wheel_read`, que lê periodicamente a velocidade angular das rodas com chamadas ao serviço `get_joint_properties`.

As leituras simuladas do LIDAR frontal do andador são publicadas no tópico `roslaser`. Isso é feito de forma distinta das leituras das rodas, sem o uso de um nó intermediário: foi utilizado o plugin `libgazebo_ros_laser`, que é inicializado juntamente com a criação do LIDAR na simulação, que publica no tópico `roslaser` diretamente.

4.3.3 Protocolo experimental das simulações

Para a validação das estratégias de desvio propostas no Capítulo 3, foram realizadas simulações no GAZEBO de um andador virtual controlado pelo ROS. Os testes realizados tiveram por objetivo comparar a técnica de campos potenciais à técnica de desvio de ponto crítico proposta na situação de cruzamento de corredor. Para isso, foram repetidos testes sob as mesmas condições iniciais, modificando somente a técnica de desvio empregada pelo andador virtual.

Para simular a situação de cruzamento de corredor, o andador foi posicionado inicialmente no centro de um corredor com largura 3,0m, apontando na direção longitudinal do corredor. Esse andador se encontra executando a técnica de controle de admitância, estando sujeito a forças de um usuário e de um algoritmo de desvio. Os parâmetros desse controle de admitância podem ser encontrados na Tabela 2. Considerou-se sempre que o usuário do andador sempre aplica uma força de 15N para frente em cada apoio de antebraço, de forma que na ausência de forças de navegação o andador tende a se deslocar sempre para frente com velocidade 0,3m/s. Assim, somente as forças do algoritmo de desvio que provocam qualquer movimento de mudança de direção por parte do andador.

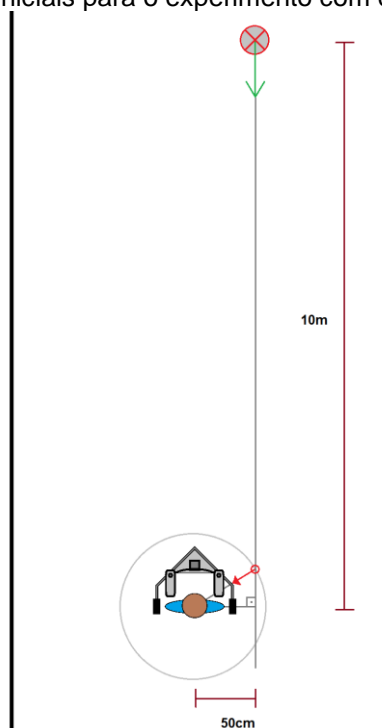
Parâmetro	Valor	Unidade
m	20,0	[kg]
J	2,0	[kg·m ²]
B	100	[N·s/m]
B_{ω}	40,0	[N·m·s/rad]
F_{min}	3,0	[N]
τ_{min}	1,00	[N·m]
d_1	0,25	[m]
d_2	0,50	[m]

Tabela 2 – Valores do controle de admitância do UFES Smart Walker simulado.

Para simular uma pessoa cruzando o corredor, foi criado um cilindro com raio 20cm que se desloca com velocidade constante de 0,3m/s no sentido contrário ao anda-

dor. Esse cilindro se encontra deslocado do andador por 10m no sentido longitudinal e por 50cm no sentido lateral do corredor, conforme mostrado na Figura 42.

Figura 42 - Condições iniciais para o experimento com cruzamento em corredor.



As simulações tiveram duração de 30s além do momento inicial, de forma que houvesse oportunidade para o cruzamento entre o andador e o obstáculo. As condições iniciais do teste se encontram descritas em um arquivo tipo `world` (`corridor.world`) do Gazebo, que descreve todos os elementos físicos da simulação e suas posições no momento inicial da simulação. As diferentes estratégias de desvio testadas são implementadas pela passagem de parâmetros distintos para um nó `social_nav`, e a seleção desses parâmetros é feita em um arquivo tipo `launch` (`social_nav.launch`).

Todos os dados da simulação foram armazenados em um arquivo `rosvbag`, que foi usado para reconstruir gráficos da trajetória do andador e do obstáculo e para obter os parâmetros de maior força de desvio aplicada e menor distância até o obstáculo, que foram utilizados como métricas para avaliar as diferentes estratégias. Tais métricas foram interpretadas considerando que é preferível um valor menor de força máxima de desvio, resultando em uma estratégia menos intrusiva, e um valor maior de distância mínima até o obstáculo, resultando em uma trajetória com menor risco de colisão.

5 Validação experimental, resultados e discussão

5.1 Testes em simulação

A técnica de desvio de ponto crítico foi comparada ao desvio por campos potenciais utilizando o protocolo descrito na subseção 4.3.3. Entretanto, deve-se ressaltar que ambas as técnicas podem ser implementadas de diversas formas, pois as duas possuem muitos graus de liberdade.

A técnica de campos potenciais tem como graus de liberdade o alcance máximo do campo (d_{MAX}), a intensidade máxima da força (F_{MAX}) e da função que relaciona campo e distância aos obstáculos (Equação (2.4)). A técnica de desvio de ponto crítico possui ainda mais graus de liberdade porque ela, por definição, implementa a técnica de campos potenciais para lidar com obstáculos fixos. Assim, ela dispõe dos mesmos graus de liberdade dessa, e ainda pode variar parâmetros relativos aos obstáculos fixos como r_{desv} e t_{MAX} .

Para que seja possível realizar uma comparação justa entre as técnicas, sem o risco de favorecer a técnica de desvio de ponto crítico através de *overfit*, foram testadas diversas variações da técnica de campos potenciais, modificando os parâmetros d_{MAX} e F_{MAX} em busca do melhor resultado.

5.1.1 Testes com campos potenciais

A técnica de campos potenciais foi testada utilizando os alcances (d_{MAX}) de 1,3m, 1,5m e 2,0m. Para cada um desses valores de alcance de campo, o valor de F_{MAX} foi variado para que fossem encontrados limites superiores e inferiores: quando F_{MAX} é muito pequeno, a força de desvio não tem intensidade para evitar a colisão (ver Figura 43 - Colisão causada por força de desvio muito reduzida ($F_{MAX} = 30N$ e $d_{MAX} = 1,5m$). Figura 43), e quando F_{MAX} é muito grande, o andador realiza manobras de desvio exageradas, oscilando antes de encontrar o obstáculo e até invertendo seu sentido no corredor.

As trajetórias resultantes desses experimentos se encontram nas Figura 44, Figura 45 e Figura 46. Os valores de menor distância até o obstáculo e maior força de desvio se encontram na Tabela 3.

Figura 43 - Colisão causada por força de desvio muito reduzida ($F_{MAX} = 30N$ e $d_{MAX} = 1,5m$).

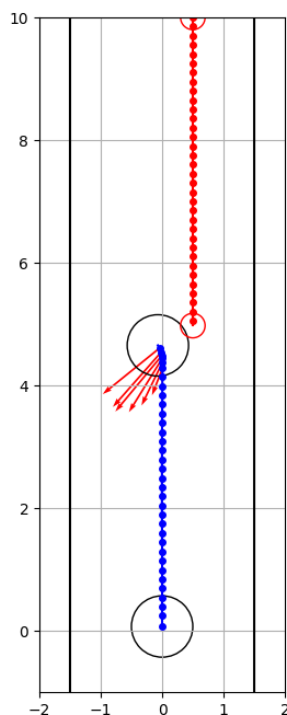


Figura 44 - Trajetórias para $d_{MAX} = 1,3m$.

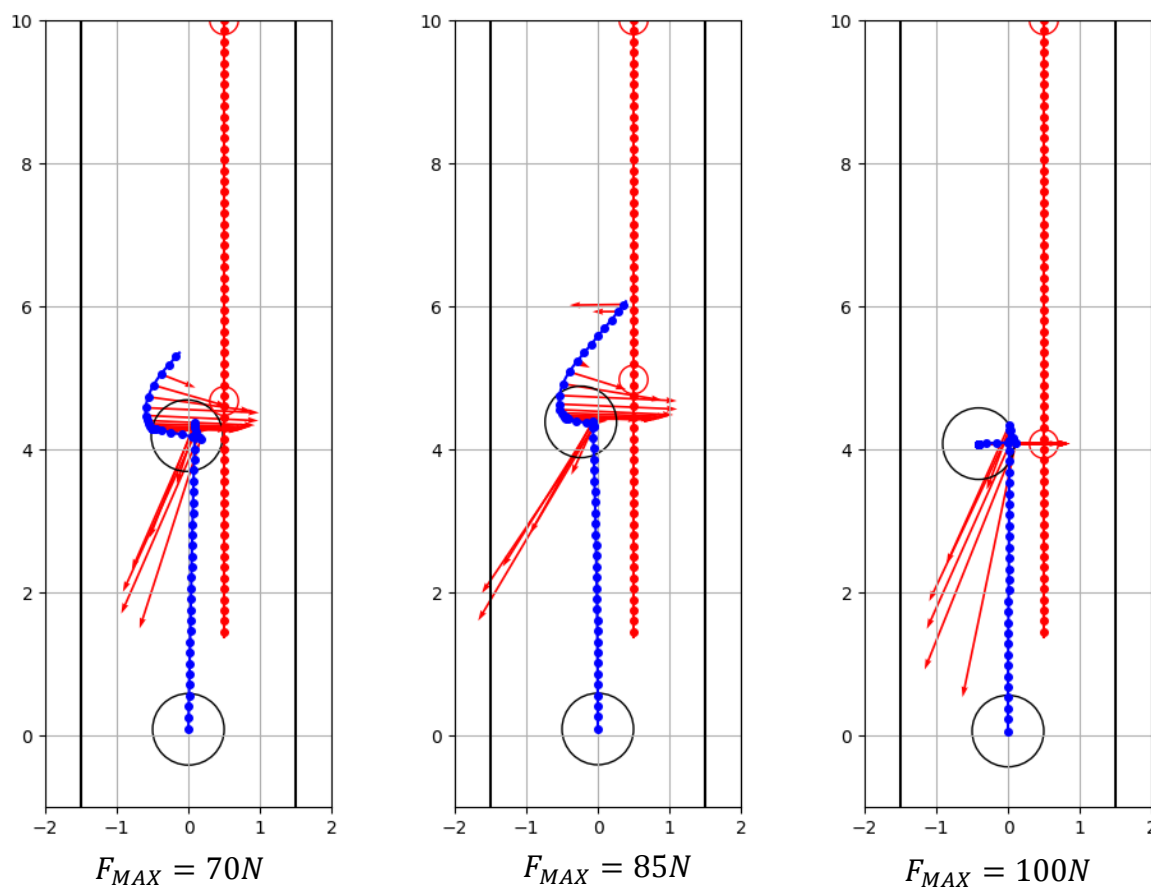
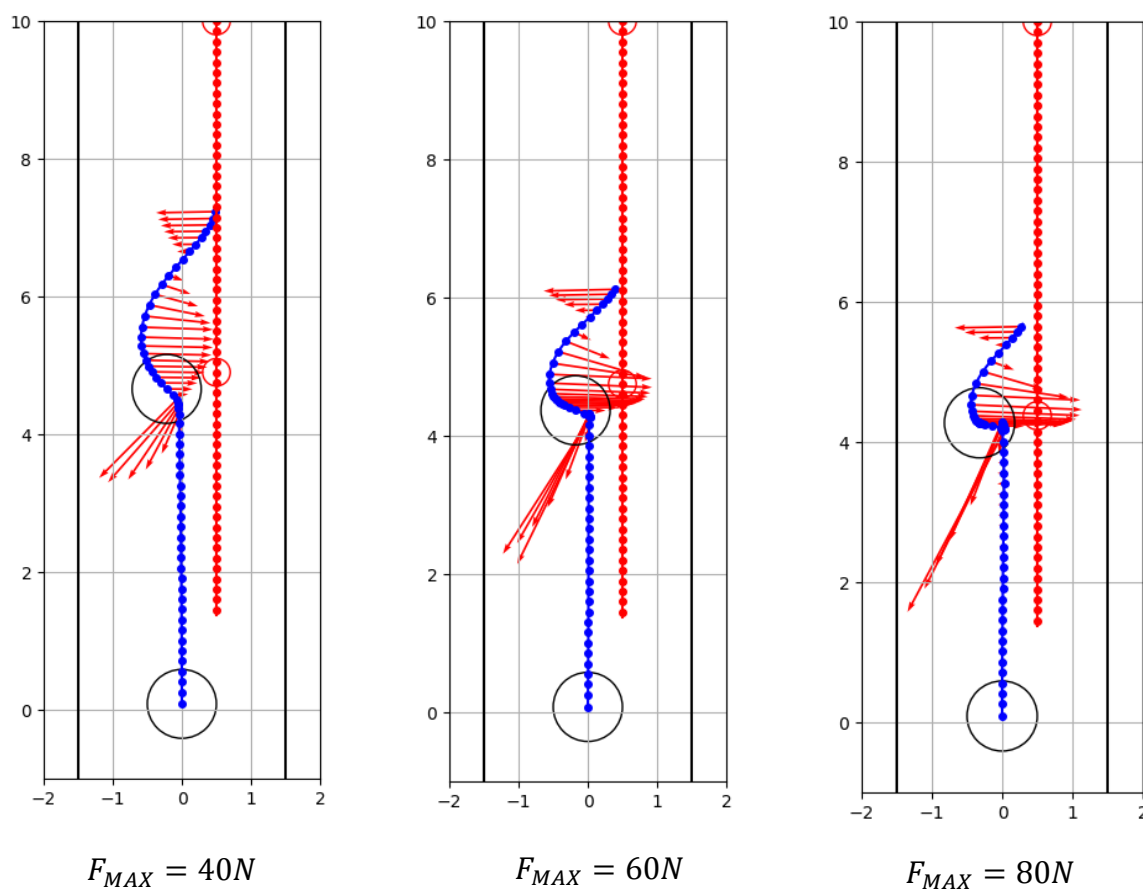


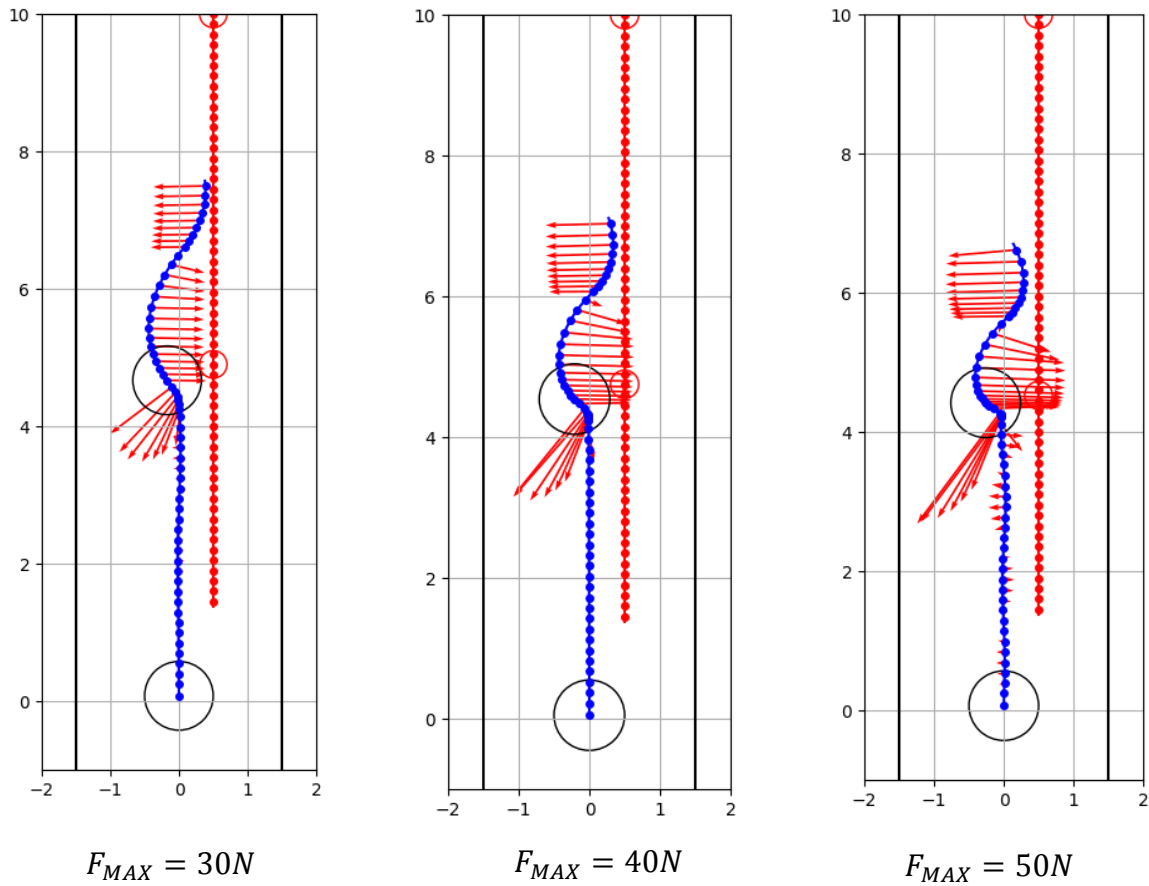
Figura 45 - Trajetórias para $d_{MAX} = 1,5m$.



d_{MAX}	F_{MAX}	Maior força de desvio	Menor distância ao obstáculo
1,3m	70N	69,7N	70,9cm
	85N	79,2N	94,5cm
	100N	91,8N	91,0cm
1,5m	40N	39,8N	76,0cm
	60N	59,7N	77,7cm
	80N	76,5N	82,8cm
2,0m	30N	29,9N	71,1cm
	40N	39,8N	74,0cm
	50N	49,5N	76,6cm

Tabela 3 – Valores de maior força e menor distância.

Figura 46 - Trajetórias para $d_{MAX} = 2,0m$.



5.1.2 Teste com desvio de ponto crítico

Foi realizado um único teste com a técnica de desvio de ponto crítico, utilizando os valores de 1,3m para d_{MAX} e 30N para F_{MAX} (os valores menos intrusivos encontrados nos testes anteriores). Para o valor máximo da força de desvio de obstáculos móveis (F_{mov}) também foi utilizado F_{MAX} . Considerou-se ainda que os obstáculos móveis detectados possuem raio 20cm (de forma consistente com o cilindro na simulação) e que o valor de r_{desv} é 30cm – ou seja, que o usuário do andador pode manter uma distância de 30cm de um obstáculo móvel sem que qualquer força de repulsão seja produzida.

Foi obtida uma força máxima de desvio de 14,9N, e uma menor distância até o obstáculo de 110,7cm, superando com facilidade os resultados do desvio somente por campos potenciais. A trajetória do andador pode ser verificada na Figura 47. A Figura 48 contém gráficos relativos à força de desvio ao longo da trajetória do andador durante o experimento.

Figura 47 - Trajetória para o desvio de ponto crítico.

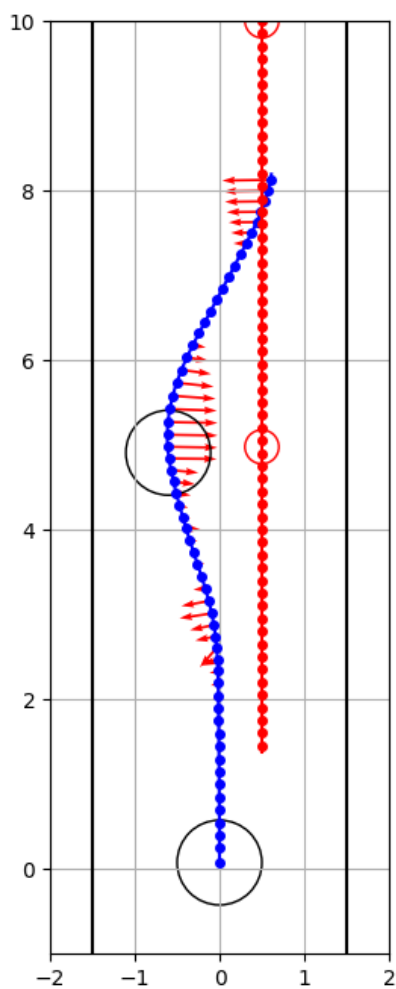
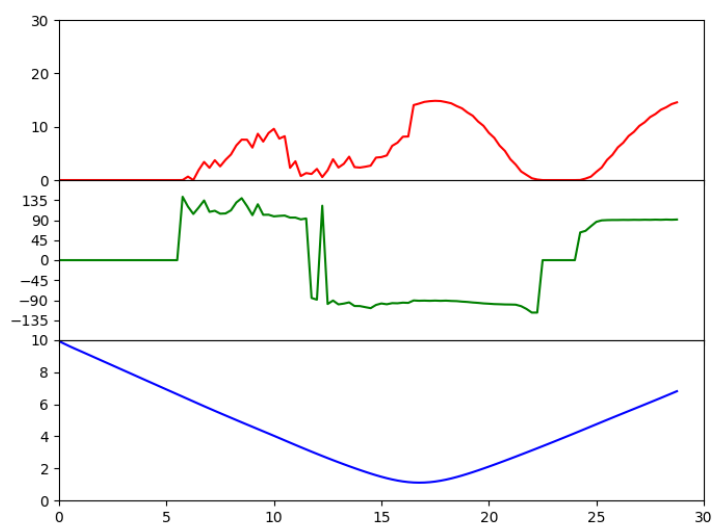


Figura 48 – Gráficos de módulo e ângulo de força de desvio (vermelho e verde) e de distância até o obstáculo com o desvio de ponto crítico (azul).



5.1.3 Discussão

Os resultados da simulação confirmaram que a técnica de desvio de ponto crítico se comporta melhor que o desvio por campos potenciais na situação de cruzamento de corredor. Ao comparar a Figura 47 com as demais trajetórias, fica claro que a melhor performance da técnica de desvio de ponto crítico se deve ao fato de a ação de desvio ser iniciada com grande antecedência, permitindo assim que uma força de desvio menor produza um afastamento maior do obstáculo. Também foi possível verificar que houve redução na ação de frenagem do andador, o que permitiu que o andador percorresse uma distância maior.

Foi possível verificar ainda uma relação de compromisso entre d_{MAX} e F_{MAX} nos testes realizados com a técnica de campos potenciais. Tal resultado pode ser explicado pelo fato de que um aumento em d_{MAX} faz com que a ação de desvio seja iniciada antes, o que faz com que uma força menor seja necessária para produzir um desvio semelhante.

5.2 Testes qualitativos no UFES Smart Walker

Foram realizados testes no UFES Smart Walker para validar a técnica de campos potenciais e as técnicas propostas em um andador real. Os experimentos descritos nessa seção foram qualitativos, tendo por objetivo principal obter as impressões dos usuários ao usar um andador inteligente executando diversas estratégias de desvio. Os testes foram realizados com usuários jovens sem deficiências de visão, locomoção ou cognitivas, que eram instruídos a operar o UFES Smart Walker em um corredor com distância de 3,0m entre paredes sob diversas circunstâncias. A Figura 49 ilustra essas condições.

Figura 49 - Testes sendo realizados no UFES Smart Walker



Inicialmente, foram realizados testes sem qualquer estratégia de desvio, com o andador sendo controlado somente pela técnica de controle de admitância. Verificou-

se que a técnica de controle de admitância implementada de fato resultou em um controle intuitivo, uma vez que usuários sem qualquer experiência prévia foram capazes de operar o andador com facilidade ao serem instruídos que o andador responde intuitivamente ao ser empurrado. Também foi interessante verificar que a maioria dos usuários do andador se surpreenderam com o peso do andador ao tentar erguê-lo após o fim dos testes, o que sugere que a técnica de controle de admitância teve sucesso em causar a impressão de que a massa do andador era igual ao parâmetro m do controlador de admitância.

Uma queixa comum dos usuários enquanto testavam o controle de admitância do andador foi a ocorrência de pequenos movimentos erráticos enquanto o usuário tentava manter o andador parado. Determinou-se que esse problema era causado por uma combinação de três fatores: o atrito estático do motor, o uso de um controlador PID de velocidade das rodas, e a geração de *setpoints* de velocidade com valores muito baixos, resultante de pequenas forças aplicadas pelo usuário no andador mesmo quando parado. A combinação desses fatores produzia uma integração de um pequeno erro de velocidade enquanto o andador permanecia parado, que resultava nos movimentos erráticos mencionados. Esse problema foi resolvido com a introdução de valores mínimos para a força e o torque (F_{min} e τ_{min}) de atrito descrito nas equações (4.6) e (4.7).

Em seguida, tentou-se determinar os melhores valores para os parâmetros do controle de admitância do andador. Foram feitos testes modificando os parâmetros do andador e interrogando os usuários se eles preferiam a maneira como o andador se comportava antes ou depois da mudança. Nesses testes, percebeu-se que os usuários consistentemente preferiram valores menores de massa e atrito, e que frequentemente os usuários operavam o andador com sua velocidade saturada (de aproximadamente 0,5m/s). Tais resultados foram interpretados como consequência da realização de experimentos em usuários saudáveis e sem deficiência, que estão acostumados a se deslocar mais rápido que a velocidade máxima do andador. Assim, no fim o feedback dos usuários acabou sendo ignorado, e foram escolhidos valores de B e B_ω para que o andador não operasse com sua velocidade sempre saturada. Os valores finais dos parâmetros do controle de admitância se encontram na Tabela 2, e foram utilizados em todos os demais testes com o andador real.

Parâmetro	Valor	Unidade
m	7,5	[kg]
J	2,5	[kg·m ²]
B	70	[N·s/m]
B_ω	12,5	[N·m·s/rad]
F_{min}	2,5	[N]
τ_{min}	1,25	[N·m]
d_1	0,25	[m]
d_2	0,50	[m]

Tabela 4 – Valores do controle de admitância do andador real

5.2.1 Testes com campos potenciais

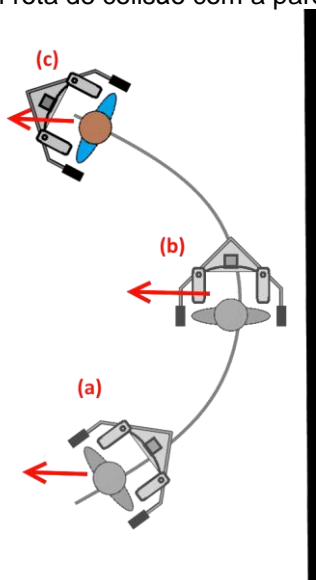
A técnica de desvio por campos potenciais foi testada com usuários vendados e desorientados (os voluntários realizavam um movimento de giro até não saber mais sua orientação em relação ao corredor), para que eles fossem obrigados a depender

do algoritmo para não colidir com as paredes do corredor. Durante esses testes, a técnica de campos potenciais teve sucesso em evitar colisões com as paredes dos corredores. Entretanto, observou-se um movimento oscilatório do andador, de forma bastante similar ao descrito na Figura 17; tal resultado era esperado pois é característico de um robô autônomo navegando com a técnica de campos potenciais. Além disso, verificou-se que o alcance escolhido para o campo potencial teve um efeito considerável sobre o conforto do usuário do andador: quando foram utilizados campos com alcance curto (0,8m além do centro do andador), alguns usuários se queixaram que a ação de correção do andador foi exagerada, e produzia uma mudança na orientação do andador muito brusca; essa queixa deixou de ocorrer quando o alcance do campo potencial foi estendido para 1,2m.

Em seguida, o mesmo teste foi repetido sem que os usuários usassem vendas, e esses foram instruídos a não desviar das paredes até que o andador “tentasse desviar” das paredes. Nesse caso, o desvio ocorreu com maior antecedência e não houve oscilação, e as queixas de forças exageradas de desvio não ocorreram.

Adicionalmente, foram realizados testes em que os usuários foram instruídos a se deslocar propositalmente em direção uma parede ou uma pessoa, resistindo às forças de desvio produzidas pelo andador. Nesse teste, verificou-se que, após se aproximar muito de um obstáculo, a força de repulsão pode tornar-se desconfortável, o que é especialmente incômodo quando tal força não parece justificável pois o usuário não se encontra mais em rota de colisão com o obstáculo, conforma ilustrado na Figura 50.

Figura 50 - As forças de desvio em (b) e (c) são indesejadas pois o andador não se encontra mais em rota de colisão com a parede.



Por fim, a situação de cruzamento em corredor foi simulada ao vender o usuário do andador e instruí-lo a andar ao longo do centro do corredor enquanto uma pessoa se deslocava em uma linha paralela, no sentido oposto e afastada de 45cm do centro do corredor, em uma tentativa de repetir o experimento realizado no andador simulado. Nessa situação verificou-se que a técnica de campos potenciais não se com-

portou muito bem, conforme o esperado: o andador realizou um desvio bastante tardio, de modo que a pessoa que se encontrava em rota de colisão com o andador foi sempre obrigada a parar seu movimento ou a se desviar do andador para que não ocorresse uma colisão.

5.2.2 Testes com o desvio de ponto de colisão

A estratégia de desvio de ponto de colisão foi testada no UFES Smart Walker ao pedir que os usuários simulassem as situações de cruzamento de corredor e de interação social, descritas no capítulo 3 e ilustradas na Figura 23. Foi utilizado um raio de colisão ($R_a + R_o$, conforme a Equação (3.8)) de 0,8m. Durante esses testes, verificou-se que essa estratégia de fato permitiu uma maior aproximação entre o usuário do andador e demais pedestres. No entanto, quando o usuário do andador se encontrava muito próximo de outra pessoa, um pequeno movimento dessa era capaz de provocar uma reação muito brusca no andador, o que foi considerado um resultado indesejado.

Para a realização de testes da técnica de desvio na situação de cruzamento em corredor, foi repetido o teste realizado com a técnica de campos potenciais que envolvia vender o usuário e colocá-lo em rota de colisão com um pedestre caminhando no sentido oposto. Nesse teste foi observado que a ação de desvio ocorreu com considerável antecedência, conforme o esperado. Entretanto, foi também observado um resultado errático: assim que o andador mudava sua direção e se aproximava da situação em que ele não estaria mais em rota de colisão com o obstáculo, a força de desvio desaparecia e reaparecia bruscamente. Esse comportamento foi descrito como bastante desagradável pelos usuários, e motivou a técnica de desvio de ponto próximo.

5.2.3 Testes de cruzamento de corredor

O teste de cruzamento de corredor foi executado com a técnica de desvio de ponto próximo e com a técnica de campos potenciais (sem informar qual delas era executada aos usuários do andador) para que fosse possível comparar as forças e trajetórias. A Figura 51 e a Figura 52 contêm, respectivamente, as forças e trajetórias obtidas nos testes com a técnica de campos potenciais e com o desvio de ponto próximo.

Figura 51 - Trajetórias dos andadores com campos potenciais (a) e desvio de ponto próximo (b).

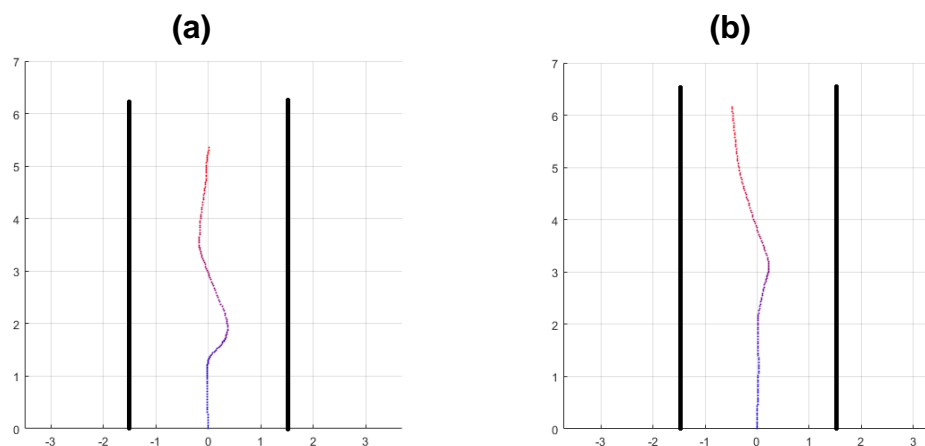
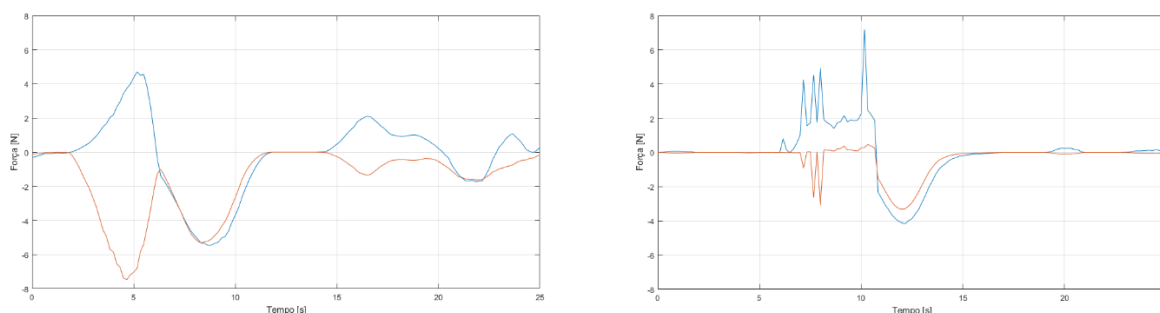


Figura 52 – Forças de desvio em x (vermelho) e y (azul) produzidas por campos potenciais e desvio de ponto próximo.



Nos experimentos realizados, a estratégia de desvio de ponto próximo funcionou conforme o esperado, realizando uma ação de desvio antecipada e suave, enquanto que a técnica de campos potenciais provocou uma grande redução na velocidade seguida de um desvio bastante brusco. No entanto, a partir dos gráficos de forças, é possível perceber picos nas forças de desvio. Tais picos foram atribuídos a ruídos na estimativa da velocidade do obstáculo móvel causados pela baixa taxa de amostragem (5Hz e 360 pontos por volta) do LIDAR utilizado. Esse tipo de ruído também pode ser verificado na simulação (Figura 48), mas com menor intensidade – um resultado consistente com a maior taxa de amostragem e acurácia do sensor simulado.

6 Conclusão e trabalhos futuros

6.1 Conclusão e discussão

Essa Dissertação de Mestrado descreve a elaboração, implementação e validação de técnicas de desvio de obstáculos móveis aplicadas a um andador inteligente. O algoritmo final proposto – desvio de ponto crítico – modifica a forma que a técnica de campos potenciais se comporta na presença de obstáculos móveis, realizando a previsão da trajetória futura do andador e do obstáculo e produzindo uma força virtual que tende a retirar o andador de uma rota de colisão. A técnica proposta se provou capaz de induzir o desvio de um obstáculo móvel com maior antecedência e de forma mais suave que a técnica de campos potenciais tanto em testes práticos quanto em simulações, sem que para isso fosse necessário sacrificar a liberdade do usuário.

Grande ênfase foi dada, nesta Dissertação, à interface humano-robô que existe entre o usuário e o andador, de modo que o resultado final foi uma estratégia de controle partilhado (em contraste ao controle *negociado* presente em alguns outros andadores na literatura) na qual as forças de desvio aplicadas no andador podem ser resistidas com o esforço consciente do usuário. Dessa forma, o usuário recebe “sugestões” de desvio de forma intuitiva e retém o controle sobre o caminho que será percorrido pelo andador. Uma possível vantagem adicional (que não pode ser verificada nos testes realizados) desse tipo de técnica é que a ação de uma força de desvio pode alertar o usuário sobre a existência de obstáculos e ajudá-lo a dirigir sua atenção na direção corretamente, complementando, portanto, a percepção que o usuário tem do ambiente ao seu redor.

Os testes realizados com usuário com e sem vendas (seção 5.2.1) confirmam que o uso de estratégias de controle partilhado, como a estratégia implementada, permite que o humano e o algoritmo de desvio complementem um ao outro, evitando as fraquezas individuais de cada um. Entretanto, para que esse tipo de estratégia produza bons resultados, parece necessário que o humano retenha certa capacidade de navegação e percepção do ambiente ao seu redor. No caso de usuários sem tais capacidades (por exemplo, no caso dos voluntários vendados nos testes realizados), pode ser mais interessante o uso de estratégias de janela dinâmica, onde o humano estabelece o destino final, mas detém menor influência sobre a trajetória percorrida até lá.

Por fim, é importante ressaltar que a estratégia proposta (bem como a técnica de campos potenciais) realiza somente a tarefa de desvio de obstáculos, que envolve somente tentar evitar que o andador se aproxime em demasia de obstáculos. Ainda que a técnica proposta faça com que o usuário seja sempre repellido por obstáculos próximos, isso não é o suficiente para garantir que a navegação ocorrerá de forma segura na proximidade de diversos obstáculos se movendo erráticamente. Nesses casos, técnicas que garantam a segurança do usuário de forma explícita (limitando

sua velocidade, impedindo movimentos bruscos, evitando movimentos para trás) são necessárias. Assim, ainda que a estratégia proposta tenha tido sucesso nas situações testadas, ela não é, sozinha, suficiente para garantir uma estratégia adequada de auxílio à navegação em andador inteligente.

6.2 Contribuições

6.2.1 Publicações

A estratégia de desvio de ponto de colisão e os experimentos realizados no andador UFES Smart Walker foram objeto de uma publicação em congresso:

- SOUZA, F. V.; FRIZERA NETO, A. ; HERNANDEZ, M. F. J. ; MELLO, R. C. . Desvio de obstáculos móveis em andador inteligente. In: IX Congreso Iberoamericano de Tecnología de Apoyo a la Discapacidad, 2017, Bogotá. Actas del IX Congreso Iberoamericano de Tecnología de Apoyo a la Discapacidad, 2017. p. 625-632.

Além disso, o autor também participou de outra publicação relacionadas ao desenvolvimento de estratégias de controle para o UFES Smart Walker:

- MELLO, R. C. DE; JIMENEZ; MARIO F.; SOUZA, F. V.; RIBEIRO, M. R. N.; FRIZERA-NETO, A. . Impacto da Latência em Sistemas Cyber-Físicos em Nuvem: Métricas Subjetiva e Objetiva para Andador Robótico. in *XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente* (2017).

6.2.2 Contribuições adicionais

Durante a realização deste trabalho, foi implementada uma biblioteca para controle do andador UFES Smart Walker no sistema de tempo real Simulink RealTime. Além disso, as técnicas de desvio propostas foram implementadas no ROS, e um modelo do UFES Smart Walker foi elaborado no simulador GAZEBO. Os códigos-fonte com o modelo do andador, a implementação da simulação e os nós de controle foram disponibilizado em https://bitbucket.org/ntaufes/ufes_sw/src/master/.

6.2.3 Trabalhos futuros

O tema do trabalho desenvolvido nesta Dissertação de Mestrado é relativamente distinto de trabalhos anteriores envolvendo o UFES Smart Walker, que tinham como principal foco o aprimoramento de técnicas de controle e da interface entre usuário e andador. Assim, uma possibilidade óbvia de trabalho futuro é a incorporação de interfaces mais elaboradas que o simples controle de admitância utilizando a força nos apoios de antebraço. Exemplos incluem a eliminação da influência de componentes periódicas de marcha (que não indicam intenção de movimento) ou a medição da distância às pernas do usuário para que sejam detectadas suas intenções de movimento²⁰.

Outra possibilidade bastante promissora é o aprimoramento das técnicas de detecção e *tracking* de obstáculos móveis, uma vez que o sensor utilizado – um LIDAR

que realiza leituras em um plano – pode não ser capaz de detectar obstáculos muito baixos ou altos e tem baixa taxa de amostragem (360 pontos por volta, 5 voltas por segundo), o que prejudica consideravelmente a estimativa da velocidade dos obstáculos móveis. Uma possibilidade promissora é o uso de câmeras RGB ou RGBD para a detecção dos obstáculos móveis. Esse tipo de sensor tem custo relativamente baixo e permite o uso de técnicas de reconhecimento de imagens para detecção de pessoas, de modo que obstáculos móveis podem ser reconhecidos imediatamente, sem que se seja necessário que elas se movam entre diferentes leituras.

Por fim, é crucial que sejam realizados testes em indivíduos afetados por deficiências de mobilidade, visão e/ou cognitivas para que seja possível avaliar adequadamente a performance das técnicas propostas. No entanto, para a realização desses testes é fundamental garantir a segurança desses usuários, o que implica a implementação de restrições e regras de segurança para situações de risco.

Bibliografia

1. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, P. D. World population prospects. *United Nations* **1**, (2015).
2. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, P. D. Potential support ratio (20-64/65+) by major area, region and country, 1950-2100 (ratio of population 20-64 per population 65+). (2015). Available at: <https://esa.un.org/unpd/wpp/Download/Standard/Population/>.
3. Ghironzi, G., Capeta, J. C., Cortés, A. F. & Bettelli, G. Aging and Age-related Functional Changes. 3–8 (2017). doi:10.1017/9781316488782.004
4. Reagan-Steiner, S. *et al.* Prevalence of Disability and Disability Type Among Adults — United States, 2013. *Mmwr* **64**, 784–792 (2015).
5. World Health Organization. The International Classification of Functioning, Disability and Health. *World Heal. Organ.* **18**, 237 (2001).
6. Yong, V. Mobility limitations. *Int. Encycl. Rehabil.* 1–11 (2010). doi:<http://cirrie.buffalo.edu/encyclopedia/en/article/259/>
7. Martins, M. M., Santos, C. P., Frizera-Neto, A. & Ceres, R. Assistive mobility devices focusing on Smart Walkers: Classification and review. *Rob. Auton. Syst.* **60**, 548–562 (2012).
8. Requejo, P. S., Furumasu, J. & Mulroy, S. J. Evidence-based strategies for preserving mobility for elderly and aging manual wheelchair users. *Top. Geriatr. Rehabil.* **31**, 26–41 (2015).
9. Bateni, H. & Maki, B. E. Assistive Devices for Balance and Mobility : Benefits , Demands , and Adverse Consequences. **86**, 134–145 (2005).
10. Buated, W., Sriyudthsak, M., Sribunruangrit, N. & Bhidayasiri, R. A low-cost intervention for improving gait in Parkinson's disease patients: A cane providing visual cues. *Eur. Geriatr. Med.* **3**, 126–130 (2012).
11. Benjamin, J. M. The laser cane. *Bull. Prosthet. Res.* 443–450 (1974).
12. Martins, M., Santos, C., Frizera, A. & Ceres, R. A review of the functionalities of smart walkers. *Med. Eng. Phys.* **37**, 917–928 (2015).
13. Faruqui, S. R. & Jaebon, T. Ambulatory assistive devices in orthopaedics: Uses and modifications. *J. Am. Acad. Orthop. Surg.* **18**, 41–50 (2010).
14. Lacey, G. & Rodriguez-losada, D. The Evolution of Guido - A Smart Walker for the Blind. *Robot. Autom. Mag.* 75–83 (2008).
15. Wasson, G., Gunderson, J. & Graves, S. Effective Shared Control in Cooperative Mobility Aids. *Proc. Fourteenth Int. Florida Artif. Intell. Res. Soc. Conf.* **1**, 1–5 (2001).
16. Hirata, Y., Hara, A. & Kosuge, K. Passive-type intelligent walking support system 'RT Walker'. *2004 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. (IEEE Cat. No.04CH37566)* **4**, 3871–3876 (2004).
17. Frizera, A. & Raya, R. The Smart Walkers as Geriatric Assistive Device: The

SIMBIOSIS Purpose. (2008).

18. Martins, M., Santos, C. & Frizera, A. Online control of a mobility assistance Smart Walker. *2012 IEEE 2nd Port. Meet. Bioeng. ENBENG 2012* (2012). doi:10.1109/ENBENG.2012.6331388
19. Valadao, C., Bastos, T., Frizera, A. & Carelli, R. Towards a Smart Walker controller for physiotherapy and rehabilitation purposes. *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.* 1578–1583 (2014). doi:10.1109/ISIE.2014.6864850
20. Cifuentes, C. A. & Frizera-neto, A. *Human-Robot Interaction Strategies for Walker-Assisted Locomotion*. (2015). doi:10.1007/978-3-319-34063-0
21. Dubowsky, S. *et al.* PAMM - a robotic aid to the elderly for mobility assistance and monitoring: a 'helping-hand' for the elderly. *Proc. 2000 ICRA. Millenn. Conf. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. Symp. Proc. (Cat. No.00CH37065)* **1**, 570–576 (2000).
22. Panteleris, P. & Argyros, A. A. Vision-based SLAM and moving objects tracking for the perceptual support of a smart walker platform. in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* **8927**, 407–423 (2015).
23. Lamiriaux, F., Bonnafous, D. & Lefebvre, O. Reactive path deformation for nonholonomic mobile robots. *IEEE Trans. Robot.* **20**, 967–977 (2004).
24. McLachlan, S., Arblaster, J., Liu, D. K., Miro, J. V. & Chenoweth, L. A multi-stage shared control method for an intelligent mobility assistant. *Proc. 2005 IEEE 9th Int. Conf. Rehabil. Robot.* **2005**, 426–429 (2005).
25. Divan, S., Fontanelli, D. & Palopoli, L. Hybrid Feedback Path Following for Robotic Walkers via Bang-Bang Control Actions. **1**, 4855–4860 (2016).
26. MacNamara, S. & Lacey, G. A smart walker for the frail visually impaired. *Proc. 2000 ICRA. Millenn. Conf. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. Symp. Proc. (Cat. No.00CH37065)* **2**, 1354–1359 (2000).
27. Scherer, M. J. Outcomes of assistive technology use on quality of life. *Disabil. Rehabil.* **18**, 439–448 (1996).
28. Van Hook, F. W. Ambulatory Devices for Chronic Gait Disorders in the Elderly. 1717–1724 (2003).
29. Bradley, S. M. & Hernandez, C. R. Geriatric Assistive Devices. 405–411 (2011).
30. Lam, R. Choosing the correct walking aid for patients. *Can. Fam. Physician* **53**, 2115–2116 (2007).
31. Churchward, R. The development of a standing wheelchair. *Appl. Ergon.* **16**, 55–62 (1985).
32. Smith, A. Patent: Invalid Walker. 2–7 (1970).
33. Mulley, G. Walking frames. *BMJ* **300**, 925–7 (1990).
34. Hamzeh, M. A., Bowker, P. & Sayegh, A. The energy costs of ambulation using

- two types of walking frame. *Clin. Rehabil.* **2**, 119–123 (1988).
35. Kai, Y. *et al.* A walking support/evaluation machine for patients with parkinsonism. *J. Med. Investig.* **51**, 117–124 (2004).
 36. Lacey, G. & Dawson-Howe, K. Evaluation of Robot Mobility Aid for the Elderly Blind. *Proc. Fifth Int. Symp. Intell. Robot. Syst.* (1997).
 37. Lacey, G. & Dawson-Howe, K. M. The application of robotics to a mobility aid for the elderly blind. *Rob. Auton. Syst.* **23**, 245–252 (1998).
 38. Martins, M., Frizera, A., Ceres, R. & Santos, C. Legs tracking for walker-rehabilitation purposes. *5th IEEE RAS/EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics* 387–392 (2014). doi:10.1109/BIOROB.2014.6913807
 39. Hirata, Y., Hara, A. & Kosuge, K. Motion Control of Passive Intelligent Walker Using Servo Brakes. **23**, 981–990 (2007).
 40. Postolache, O. *et al.* Smart walker solutions for physical rehabilitation. *IEEE Instrum. Meas. Mag.* **18**, 21–30 (2015).
 41. Wachaja, A. *et al.* Navigating blind people with walking impairments using a smart walker. *Auton. Robots* (2016). doi:10.1007/s10514-016-9595-8
 42. Lee, G., Ohnuma, T. & Chong, N. Y. Design and control of JAIST active robotic walker. *Intell. Serv. Robot.* **3**, 125–135 (2010).
 43. Hirata, Y., Komatsuda, S. & Kosuge, K. Fall prevention control of passive intelligent walker based on human model. in *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS* 1222–1228 (2008). doi:10.1109/IROS.2008.4651173
 44. Tausel, L., Cifuentes, C. A., Rodriguez, C., Frizera, A. & Bastos, T. Human-walker interaction on slopes based on LRF and IMU sensors. in *5th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics* 227–232 (2014). doi:10.1109/BIOROB.2014.6913781
 45. Chalvatzaki, G. G. *et al.* Towards an intelligent robotic walker for assisted living using multimodal sensorial data. *Proc. 2014 4th Int. Conf. Wirel. Mob. Commun. Healthc. - "Transforming Healthc. Through Innov. Mob. Wirel. Technol. MOBIHEALTH 2014* 156–159 (2014). doi:10.1109/MOBIHEALTH.2014.7015934
 46. Mello, R. C. de. UFES CloudWalker: A Cloud-Enabled Cyber-Physical System for Mobility Assistance. *Master's Diss.* (2018).
 47. Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R. & Scaramuzza, D. *Introduction to Autonomous Mobile Robots.* (2004).
 48. Borenstein, J. & Koren, Y. Real-Time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* **19**, 1179–1187 (1989).
 49. Thrun, S., Burgard, W. & Fox, D. *Probabilistic robotics.* (2005).
 50. Petti, S. & Fraichard, T. Safe Motion Planning in Dynamic Environments. (2007).

51. Adams, M., Vo, B. N., Mahler, R. & Mullane, J. SLAM gets a PHD: New concepts in map estimation. *IEEE Robot. Autom. Mag.* **21**, 26–37 (2014).
52. Wang, C.-C., Thorpe, C., Thrun, S., Hebert, M. & Durrant-Whyte, H. Simultaneous Localization, Mapping and Moving Object Tracking. *Int. J. Rob. Res.* **26**, 889–916 (2007).
53. Silas F. R. Alves, Joao M. Rosario, Humberto Ferasoli Filho, L. K. A. R. and R. A. T. Y. Conceptual Bases of Robot Navigation Modeling, Control and Applications. (2011). doi:http://dx.doi.org/10.5772/46845
54. Brooks, R. A. A Robust Layered Control System For A Mobile Robot. *IEEE J. Robot. Autom.* **2**, 14–23 (1986).
55. Lumia, R., Fiala, J. & Wavering, A. The NASREM robot control system standard. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* **6**, 303–308 (1989).
56. Paden, B., Cap, M., Yong, S. Z., Yershov, D. & Frazzoli, E. A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-driving Urban Vehicles. **8858**, 1–23 (2016).
57. Lumelsky, V. J. & Stepanov, A. A. Path-planning strategies for a point mobile automaton moving amidst unknown obstacles of arbitrary shape. *Algorithmica* **2**, 403–430 (1987).
58. Khatib, O. Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. *Int. J. Rob. Res.* **5**, 90–98 (1986).
59. Koren, Y. & Borenstein, J. Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation. *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.* 1398–1404 (1991). doi:10.1109/ROBOT.1991.131810
60. Borenstein, J., Koren, Y., Member, S., Arbor, A. & Laboratories, A. T. The Vector Field Histogram - Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots. *IEEE J. Robot. Autom.* **7**, 278–288 (1991).
61. Fox, D., Burgard, W. & Thrun, S. The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance. 1–23 (1997). doi:10.1109/100.580977
62. Seder, M. & Petrović, I. Dynamic window based approach to mobile robot motion control in the presence of moving obstacles. *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.* 1986–1991 (2007). doi:10.1109/ROBOT.2007.363613
63. Graf, B. Reactive navigation of an intelligent robotic walking aid. *Proc. - IEEE Int. Work. Robot Hum. Interact. Commun.* 353–358 (2001). doi:10.1109/ROMAN.2001.981929
64. Lacey, G., Namara, S. Mac & Dawson-howe, K. M. Personal Adaptive Mobility Aid for the Infirm and Elderly Blind. 211–220 (1998).
65. Yu, H., Spenko, M. & Dubowsky, S. An Adaptive Shared Control System for an Intelligent Mobility Aid for the Elderly. 53–66 (2003).
66. Wasson, G. *et al.* Adaptive mobility aids for the elderly. *Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng.* **4512**, 255–263 (2001).
67. Kortenkamp, D., Bonasso, R. P., Ryan, D. & Schreckenghost, D. Traded

- Control with Autonomous Robots as Mixed Initiative Interaction. *AAAI Tech. Rep.* **04**, 89–94 (1997).
68. Rodriguez-Losada, D., Matia, F., Jimenez, A., Galan, R. & Lacey, G. Implementing map based navigation in guido, the robotic SmartWalker. *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.* **2005**, 3390–3395 (2005).
 69. Hart, P. E. & Nils, J. Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. 100–107 (1968).
 70. Hirata, Y., Hara, A. & Kosuge, K. Motion Control of Passive-type Walking Support System based on Environment Information. 21–26 (2005).
 71. Colombo, A., Fontanelli, D., Legay, A., Palopoli, L. & Sedwards, S. Efficient customisable dynamic motion planning for assistive robots in complex human environments. *J. Ambient Intell. Smart Environ.* **7**, 617–633 (2015).
 72. Ott, C., Mukherjee, R. & Nakamura, Y. Unified impedance and admittance control. *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.* 554–561 (2010). doi:10.1109/ROBOT.2010.5509861
 73. Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J. & Xu, X. Density-Based Clustering Methods. *Compr. Chemom.* **2**, 635–654 (1996).
 74. Elias, A., Frizera, A., Bastos, T. F. & Valadao, C. Robotic walkers from a clinical point of view: Feature-based classification and proposal of the UFES Walker. *2012 ISSNIP Biosignals Biorobotics Conf. Biosignals Robot. Better Safer Living, BRC 2012* (2012). doi:10.1109/BRC.2012.6222155
 75. Cifuentes, C. A. *et al.* Multimodal Human – Robot Interaction for Walker-Assisted Gait. *Ieee Syst. J.* 1–11 (2014). doi:10.1109/JSYST.2014.2318698
 76. Quigley, M. *et al.* ROS: an open-source Robot Operating System. *Icra* **3**, 5 (2009).
 77. Koenig, N. & Howard, A. Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator. *2004 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. (IEEE Cat. No.04CH37566)* **3**, 2149–2154 (2004).